Deutscher Bundestag **Drucksache 16/3218**

16. Wahlperiode 01. 11. 2006

Bericht

des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung

Technikfolgenabschätzung (TA)

TA-Projekt: Moderne Agrartechniken und Produktionsmethoden – ökonomische und ökologische Potenziale

2. Bericht: Precision Agriculture

Inhaltsverzeichnis

Seite

Vorwort des Ausschusses 3

Zusammenfassung 4

I. Einleitung 9

1. Zielsetzung 9
2. Vorgehensweise 9
3. Aufbau des Berichtes 10

II. Definition und Komponenten von Precision Agriculture 11

1. Kontext 11
2. Definition 13
3. Verfahren und Komponenten – Ein Überblick 14
4. Datenerfassung 16
5. Datenmanagement- und Beratungssysteme 22
6. Applikations- und Navigationstechnik 24
7. Fazit 25

III. Anwendungsfelder von Precision Agriculture 26

1. Bodenbearbeitung 26
2. Aussaat 27
3. Düngung 28
4. Pflanzenschutz 31
5. Ernte 34
6. Automatische Spurführung 36
7. Dokumentation und Rückverfolgbarkeit 36
8. Stand von Forschung und Entwicklung 37
9. Fazit 39

Seite

IV. Ökonomische Aspekte von Precision Agriculture 41
1. Einflussfaktoren auf Wirtschaftlichkeit 42
2. Kosten 43
3. Betriebsmitteleinsparungen und Mehrerträge 48
4. Wirtschaftlichkeit auf Betriebsebene 52
5. Diffusion und Akzeptanz 57
6. Fazit 59

V. Ökologische Aspekte von Precision Agriculture 61
1. Umweltentlastungspotenziale 61
2. Resistenzmanagement 64
3. Integration von Arten- und Biotopschutzzielen 64
4. Fazit 65

VI. Nachhaltigkeitspotenziale von Precision Agriculture 66
1. Ziele einer nachhaltigen Entwicklung in der Landwirtschaft 66
2. Operationalisierung von Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft 72
3. Einfluss von Precision Agriculture auf wesentliche Nachhaltigkeitsdefizite 76
4. Fazit 83

VII. Handlungsmöglichkeiten und Einfluss der Agrarpolitik 85
1. Forschungsbereich Technikentwicklung 85
2. Forschungsbereich Datenmanagement, Entscheidungsfindung, Dokumentation und Systemanalyse 87
3. Einfluss agrarpolitischer Rahmenbedingungen 88
4. Förderung der Anwendung und Diffusion von Precision Agriculture 90

Literatur 91
1. In Auftrag gegebene Gutachten 91
2. Weitere Literatur 91

Anhang 98
1. Tabellenverzeichnis 98
2. Abbildungsverzeichnis 99

Vorwort des Ausschusses

Der Anbau und die Nutzung von Pflanzen sind auch in einem hoch industrialisierten Land wie der Bundesrepublik Deutschland elementare Grundlage der menschlichen Existenz. Von der Art und Weise des landwirtschaftlichen Anbaus gehen vielfältige ökologische Wirkungen auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen und die umgebenden Naturräume sowie ökonomische und soziale Wirkungen auf die in der Landwirtschaft tätigen Menschen und die gesamte Gesellschaft aus.

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) hat im Auftrag des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, u. a. auf Vorschlag des Ausschusses für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, in den vergangenen Jahren in mehreren Projekten Zukunftsperspektiven und -potenziale der Landwirtschaft und zugehöriger Technik- und Anwendungsbereiche untersucht. Es liegen Berichte über die Entwicklungstendenzen bei Nahrungsmittelangebot und -nachfrage (Bundestagsdrucksachen 15/1673 bis 1675 vom 10. Oktober 2003) und zur Grünen Gentechnik vor (Bundestagsdruckssache 16/1211 vom 7. April 2006).

Der hier vorgelegte Bericht „Precision Agriculture“ ist einer von zwei Abschlussberichten eines durch den Ausschuss für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz angeregten TA-Projektes „Moderne Agrartechniken und Produktionsmethoden – ökonomische und ökologische Potenziale“.

Der zweite Bericht behandelt das Thema „Alternative Kulturpflanzen und Anbauverfahren“. Ziel des Gesamtprojektes war es zu untersuchen, welche Beiträge moderne Agrartechniken und Produktionsmethoden für eine nachhaltige Landbewirtschaftung leisten können. Der Teilbericht „Precision Agriculture“ beschreibt und analysiert den aktuellen Stand von Forschung, Entwicklung und Anwendung einer teilflächenspezifischen, an Standort und Pflanzenbestand angepassten Bewirtschaftung, die neue Potenziale erschließt und Umweltbelastungen verringert. Er diskutiert detailliert mögliche ökonomische und ökologische Auswirkungen von Precision Agriculture und zeigt die daraus resultierenden potenziellen Beiträge zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen auf.

Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums einzelner Verfahren von Precision Agriculture existieren erhebliche Wissenslücken, so dass sich ein wesentlicher Teil der in dem Bericht vorgestellten Handlungsmöglichkeiten auf Fragen des bestehenden und zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs beziehen. Hierdurch erhalten die Ergebnisse der Analyse neben der agrar- und umweltpolitischen auch forschungspolitische Relevanz.

Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem Bericht eine aktuelle und umfassende Informationsgrundlage für die zukünftige parlamentarische Befassung mit diesem agrar-, umwelt- und forschungspolitisch bedeutenden Themenfeld.

Berlin, den 26. September 2006

Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung

Ulla Burchardt, MdB
Ausschussvorsitzende

Axel E. Fischer, MdB
Berichterstatter

Uwe Barth, MdB
Berichterstatter

Hans-Josef Fell, MdB
Berichterstatter

Swen Schulz, MdB
Berichterstatter

Dr. Petra Sitte, MdB
Berichterstatterin

Zusammenfassung

Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung hatte im Juni 2003 beschlossen, das TAB mit einem TA-Projekt zum Thema „Moderne Agrartechniken und Produktionsmethoden – ökonomische und ökologische Potenziale" zu beauftragen. Aufbauend auf einem Vorschlag des Ausschusses für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft sowie auf Anregungen aus dem Berichterstatterkreis für TA, sollte in diesem TA-Projekt untersucht werden, welche ökonomischen und ökologischen Potenziale Precision Agriculture für eine nachhaltige Landbewirtschaftung bereitstellen könnte.

Der Bericht zu „Precision Agriculture" bildet den zweiten Teil der abschließenden Berichterstattung zum TA-Projekt „Moderne Agrartechniken und Produktionsmethoden – ökonomische und ökologische Potenziale". Zuvor wurde der Teilbericht „Alternative Kulturpflanzen und Anbauverfahren" vorgelegt.

Problemstellung

Die Untersuchung moderner Produktionsmethoden soll zum einen anhand agrartechnischer Entwicklungen im Bereich Precision Agriculture, zum anderen mit Blick auf neue Entwicklungen bei alternativen Kulturpflanzen und Anbauverfahren erfolgen. Zielsetzung ist es, politische Gestaltungsmöglichkeiten im Bereich Forschungs- und Technologiepolitik, der Agrarumweltpolitik sowie der agrarpolitischen Rahmenbedingungen herauszuarbeiten.

Während mit der Nutzung alternativer Kulturpflanzen und Anbauverfahren vor allem ein Beitrag zum Erhalt der Agrobiodiversität geleistet werden soll, stehen bei Precision Agriculture die teilflächenspezifische, an Standort und Pflanzenbestand angepasste Bewirtschaftung und die damit verbundenen neuen Potenziale, die Umweltbelastungen durch landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen – insbesondere durch die bedarfsgerechte Ausbringung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln – zu verringern, im Vordergrund.

Definition und Komponenten

Precision Agriculture (PA) ist ein innovatives informationsgeleitetes Managementkonzept der pflanzlichen Produktion, das auf verschiedenen neuen oder weiterentwickelten Technologien aufbaut. Dazu zählen insbesondere satellitengestützte Ortungssysteme, Sensortechnologien zur Datenerfassung sowie Geoinformationssysteme. Mit PA können innerhalb einer Ackerfläche vorhandene, kleinräumig variierende Bodenverhältnisse und Eigenschaften des Pflanzenbestands erfasst und anhand dieser Informationen mit speziellen Systemen der Informationsauswertung sowie geeigneter Gerätetechnik die pflanzenbaulichen Maßnahmen räumlich und mengenmäßig präziser als bisher gestaltet werden. In Abhängigkeit von der zeitlichen Beziehung zwischen Datenerfassung, Entscheidungsfindung und Bewirtschaftungsmaßnahme wird bei den PA-Verfahren grundsätzlich unterschieden zwischen Offlineverfahren (Kartieransatz), Onlineverfahren (Sensoransatz) und der Kombination von Offline- und Onlineverfahren (Sensoransatz mit Kartenüberlagerung).

– Bei Offlineverfahren besteht zwischen Datenerfassung, Erstellung des Maschinenauftrags und Durchführung der Bewirtschaftungsmaßnahme kein unmittelbarer zeitlicher Zusammenhang. Sie können eingesetzt werden, wenn die Merkmale, auf deren Beeinflussung die Bewirtschaftungsmaßnahme abzielt, relativ stabil sind, wie z. B. bei der Phosphatdüngung. Die Erfassung von Boden- und Pflanzendaten sowie ihre Umsetzung in Applikationskarten sind vielfach erprobt und prinzipiell praxisreif. Einschränkungen ergeben sich teilweise durch den Arbeitsaufwand (z. B. bei manueller Bestimmung des Unkrautvorkommens) oder die anfallenden Kosten (z. B. für Bodenbeprobungen und -analysen). Die entscheidenden Schwachstellen der Offlineverfahren liegen bei der aufwendigen Verwaltung und Analyse großer Datenmengen, bei der Dateninterpretation und Entscheidungsfindung mit Hilfe von Regeln oder geeigneten Modellen sowie bei der Erstellung von Applikationskarten, die hinreichend genau und kostengünstig produzierbar sind.

– Onlineverfahren werden eingesetzt, wenn es sich um schnell ändernde Produktionsfaktoren (z. B. den Stickstoffbedarf der Kulturpflanzen) handelt und eine zeitnahe Arbeitserledigung erforderlich ist. Dabei werden die relevanten Merkmale (z. B. die Stickstoffversorgung des Pflanzenbestands) anhand von optischen, mechanischen oder biochemischen Eigenschaften des Pflanzenbestands indirekt auf dem Feld erfasst und die entsprechende Maßnahme (z. B. die Stickstoffdüngerapplikation) wird unmittelbar daran gekoppelt ausgeführt. Die wesentlichen Schwachstellen von Onlineverfahren sind die hinreichend genaue und kostengünstige Datenerfassung mittels Sensoren, die für viele Anwendungsbereiche noch im Stadium der Forschung und Entwicklung steckt, und die bislang unzureichende Berücksichtigung maßnahmenunabhängiger Einflüsse (z. B. Bodenwasservorrat) und Störgrößen (z. B. Belichtungsverhältnisse). Eine weitere Schwachstelle sind – wie bei den Offlineverfahren auch – die z. T. nicht hinreichend genauen oder fehlenden pflanzenbaulichen Regeln zur Interpretation der erfassten Sensordaten und zur Ableitung gesicherter Entscheidungsalgorithmen für die (semi)automatische Umsetzung von Sensordaten in Bewirtschaftungsmaßnahmen.

Anwendungsfelder

Anwendungsfelder für die informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit PA finden sich in allen wesentlichen Arbeitsschritten des ackerbaulichen Produktionsprozesses. Weitere Einsatzgebiete sind die satellitengestützte Spurführung mit visuellen Lenkhilfen oder Autopilotsystemen sowie die vereinfachte, umfassende und räumlich wie zeitlich differenzierte Dokumentation der durchgeführten Maßnahmen. Für einige Arbeitsschritte gibt es bereits marktreife Verfahren zur Umsetzung einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung. Dazu zählt die teilflä-

chenspezifische Stickstoffdüngung mit Onlineansätzen unter Verwendung von optoelektronischen Sensoren (z. B. Yara N-Sensor®) oder dem CROP-Meter (auch Pendelsensor genannt). Der Stickstoffsensor wird in Deutschland auf rund 400 000 ha – dies entspricht ca. 3,4 Prozent der Ackerfläche – eingesetzt, hauptsächlich in den neuen Bundesländern, ansatzweise aber auch in Niedersachsen und Schleswig-Holstein.

Zur selektiven Unkrautbekämpfung sind erste Verfahren bis zur Praxisreife entwickelt worden. Ein Beispiel ist die „sehende“ Feldspritze, die Art und Menge der Ungräser und Unkräuter erkennen und diese von den Kulturpflanzen unterscheiden kann, und die in der Lage ist, bis zu drei Wirkstoffe gleichzeitig auszubringen und die Aufwandmenge dem Befallsdruck anzupassen. Zur teilflächenspezifischen Ausbringung von Fungiziden (und auch von Wachstumsreglern) eignet sich der CROP-Meter, der anhand indirekter Merkmale (Dichte des Pflanzenbestands) auf die Notwendigkeit einer Behandlung schließt. Weitere sensorgestützte Ansätze zur indirekten und direkten Erkennung von Pilzkrankheiten sind in der Entwicklung.

Im Bereich der satellitengestützten Spurführung sind verschiedene visuelle Lenkhilfen sowie Autopilotsysteme auf dem Markt und es wird mit weiteren Neuentwicklungen gerechnet. Die Vielzahl an Anbietern deutet darauf hin, dass die Vorteile der dadurch grundsätzlich verringerten Belastung des Fahrers, der zusätzlich möglichen Arbeitseinsätze (z. B. bei Nebel) sowie der potenziellen Kostenreduktion (z. B. durch Vermeidung von Überlappungen bei der Bodenbearbeitung) bei den Landwirten auf großes Interesse stoßen.

Die Ertragskartierung gehört zu den PA-Verfahren mit dem derzeit größten Verbreitungsgrad, ist aber eher ein Verfahren zur Gewinnung teilflächenspezifischer Informationen als eine eigentliche Anwendung. Sie stellt – insbesondere, wenn diese zukünftig durch die Onlineerfassung der Qualität des Ernteguts mittels Nahinfrarot-Spektroskopie ergänzt wird – ein Qualitätskontrollsystem dar, das in Kombination mit teilflächenspezifischer Bewirtschaftung eine Optimierung des Produktionsprozesses ermöglichen könnte. Durch die Nutzung von Ertragspotenzialkarten zur teilflächenspezifischen Aussaat können bei klassischen Reihenkulturen (z. B. Mais) und hohen Saatgutkosten positive Effekte erzielt werden. Bei Getreide ist aufgrund seiner Bestockungsfähigkeiten die teilflächenspezifische Aussaat – von Trockenlagen abgesehen – für eine breite Anwendung jedoch eher fraglich. Dennoch bieten Sämaschinenhersteller ihre Geräte auch mit PA-Ausrüstung an.

Einige weitere PA-Anwendungen wurden ebenfalls bis zur Praxisreife entwickelt, ohne dass sich bislang jedoch eine breitere Anwendung abzeichnet. Hierzu gehört die teilflächenspezifische Grunddüngung mit Phosphat und Kalium. In der Entwicklung befindliche Sensoransätze könnten dazu beitragen, den hierfür derzeit erforderlichen hohen Aufwand für Bodenbeprobungen und Bodenanalysen auf ein praktikables Niveau zu senken. Die Vorteilhaftigkeit des Verfahrens ist allerdings aufgrund des bei diesen Nährstoffen angewandten Prinzips der Vorratsdüngung schwierig zu beurteilen. Es könnte zukünftig aber aufgrund der knapper und damit teurer werdenden Phosphatressourcen an Bedeutung gewinnen. Zunehmendes Interesse könnte auch der Einsatz von PA zur Regulierung von Bodenversauerung durch teilflächenspezifische Kalkung erlangen. Für die teilflächenspezifische Anpassung der Bodenbearbeitungstiefe existiert ein Verfahren, das von einem Gerätehersteller vermarktet wird. In der Praxis spielt diese PA-Technik bislang jedoch keine Rolle, obwohl sie bei entsprechender Standortheterogenität signifikante Kraftstoffeinsparungen ermöglichen könnte.

Auch der ökologische Landbau bietet Anwendungsfelder für PA. Hier sind v. a. PA-Techniken zur mechanischen bzw. thermischen Unkrautregulierung und die teilflächenspezifische Ausbringung organischer Dünger – die teilflächenspezifische Ausbringung von Gülle wird zurzeit in von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt finanzierten Feldversuchen getestet – von Interesse. Die sensorgesteuerte Querhacke ist eine bis zur Marktreife entwickelte PA-Anwendung zur Unkrautregulierung. Wegen zu hoher Kosten und zu geringer Schlagkraft gelangte sie allerdings bislang nicht in die kommerzielle Fertigung. Auch der Einsatz von PA zur teilflächenspezifischen Ernte (z. B. von Qualitätsgetreide) sowie zur Dokumentation betrieblicher Maßnahmen stellen für den ökologischen Landbau attraktive Optionen dar. Weiterführende Aussagen zu PA-Anwendungen im Ökolandbau finden sich im TAB-Hintergrundpapier Nr. 12 („Stand und Perspektiven des Einsatzes von moderner Agrartechnik im ökologischen Landbau“).

Stand der Forschung

In Deutschland sind zahlreiche Hochschulen und private Unternehmen in der Forschung zu PA engagiert. Mehrere erfolgreiche Verbundprojekte wurden in den vergangenen Jahren durchgeführt, und einige neue Projekte wurden gestartet (z. B. das BMBF-Verbundprojekt preagro II). Auch auf europäischer Ebene wurden in den vergangenen Jahren Projekte zu PA gefördert; insgesamt jedoch waren die eingesetzten Mittel relativ bescheiden. Außerhalb Europas wird z. T. intensive Forschung mit unterschiedlichen Schwerpunkten betrieben. Während in den USA die Reduzierung des Einsatzes von Dünger und Pflanzenschutzmitteln im Vordergrund steht, erwartet man in Japan, dass PA einen Beitrag zur Behebung der strukturbedingten Probleme der Landwirtschaft leisten wird.

Ökonomische Aspekte

Eine Wirtschaftlichkeit von PA-Anwendungen ist dann gegeben, wenn der Mehrerlös aufgrund von Betriebsmitteleinsparungen und höheren Erträgen die durch Anschaffung und Verwendung der PA-Technik anfallenden Ausgaben übersteigt. Während die Kosten für die Datenerfassung und Entscheidungsmodelle sowie die Applikations- und Navigationstechnik bekannt sind und relativ genau beziffert werden können, lässt sich der Nutzen von PA-Verfahren nur grob abschätzen, da er von

verschiedenen, teilweise nicht beeinflussbaren Faktoren (z. B. Witterungsverlauf) abhängig ist und die zu erwartenden Effekte je nach Bewirtschaftungsschritt, feldinterner Standortheterogenität, angebauter Kulturpflanze und Produktionsintensität unterschiedlich ausfallen.

Durch eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung kann der Mineraldüngeraufwand auf heterogenen Feldern im Durchschnitt um etwa 7 Prozent bzw. 14 kg N/ha reduziert werden, bei konstanten oder um bis zu 6 Prozent höheren Erträgen. Im Bereich der Grunddüngung und Kalkung sind ebenfalls Einsparungen beim Düngereinsatz möglich, mit nennenswerten Ertragseffekten wird dagegen nicht gerechnet. Auch im Pflanzenschutz führt der Einsatz von PA zu positiven Ergebnissen: Bei der Ausbringung von Herbiziden können im Durchschnitt rund 50 Prozent der Aufwandmenge (Spanne von 10 bis 90 Prozent) eingespart werden. Ebenso scheinen bei der Fungizidapplikation mit dem CROP-Meter Einsparungen in der Größenordnung von 10 bis 20 Prozent realisierbar; ähnliches dürfte für die Ausbringung von Wachstumsreglern gelten. Hinweise auf deutliche Einsparungen im Kraftstoffbedarf gibt es bei der teilflächenspezifischen Bodenbearbeitung. Bei der teilflächenspezifischen Aussaat sind positive Effekte (gleicher Ertrag bei reduzierter Saatstärke) bei Reihenkulturen (z. B. Mais) möglich. Zu den ökonomischen Effekten einer visuell unterstützenden oder automatischen Spurführung liegen bislang keine Ergebnisse vor. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass durch Reduktion der üblicherweise auftretenden Überlappungen bei der Bodenbearbeitung und Ausbringung organischer Dünger Einsparungen von Betriebsmitteln möglich sind.

Da die Wirtschaftlichkeit teilflächenspezifischer Maßnahmen von den jeweiligen Produktionsbedingungen abhängen, sind sie nicht ohne Weiteres verallgemeinerbar. Grundsätzlich gilt jedoch, dass PA-Anwendungen um so eher die Wirtschaftlichkeitsschwelle erreichen, je größer die bewirtschafteten Flächen und je heterogener die Standortbedingungen sind. Gegenwärtig ist die teilflächenspezifische Applikation von Stickstoff und Phosphat sowie von Herbiziden und Wachstumsreglern in Winterweizen erst dann wirtschaftlich, wenn nennenswerte Betriebsmitteleinsparungen erzielt oder die Investitionskosten für PA-Anwendungen (oder die Datenerfassung) deutlich gesenkt und Einsatzflächen von mehreren hundert ha/Jahr erreicht werden können. Die durchschnittliche landwirtschaftliche Betriebsgröße umfasst im Vergleich dazu nur rund 50 ha. Bei einer geringen betrieblichen Flächenausstattung können PA-Verfahren nur bei überbetrieblicher Organisation des Maschineneinsatzes wirtschaftlich eingesetzt werden.

Akzeptanz

Die in der Praxis hauptsächlich eingesetzten PA-Verfahren sind die Flächenvermessung, die Bodenbeprobung und die Ertragskartierung, alles Verfahren die der Informationsgewinnung dienen. Im Gegensatz dazu werden PA-Verfahren, die die gewonnenen Informationen in teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen umsetzen (z. B. die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung), deutlich weniger häufig eingesetzt. Spurführungssysteme auf der Grundlage satellitengestützer Ortungssysteme werden bereits von jedem vierten PA-Nutzer (bei den Lohnunternehmern ist es jeder zweite PA-Nutzer) angewandt.

PA wird insbesondere von jungen, gut ausgebildeten Landwirten mit überdurchschnittlich großer Flächenausstattung sowie in betriebsübergreifenden Bewirtschaftungsformen (z. B. Maschinengemeinschaft) eingesetzt. Die durchschnittliche Betriebsgröße von PA-Nutzern liegt zwischen 1 080 ha (2001) und 904 ha (2005). Wesentliche Gründe für den Einsatz sind der zu erwartende Erkenntnisgewinn über die Produktionsstandorte und die dadurch größere Entscheidungssicherheit sowie ökonomische Motive. Allerdings erwarten die meisten Landwirte Gewinnsteigerungen erst nach einer Einarbeitungs- und Anwendungsphase von fünf bis zehn Jahren.

Der überwiegende Teil der Landwirte hat zurzeit nicht die Absicht, in PA zu investieren, was angesichts der schwierigen und unsicheren wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in der Landwirtschaft, die generell kein günstiges Klima für Neuinvestitionen schaffen, nicht verwunderlich ist. Die ablehnende Haltung zu PA wurzelt darüber hinaus in unzureichenden Kenntnissen über die Effekte von PA sowie in fehlenden konkreten Praxisempfehlungen. Weitere Akzeptanzhemmnisse sind fehlende technische Normen bei Geräteschnittstellen, Bedenken bezüglich der Funktionalität und Zuverlässigkeit der Technik und Befürchtungen hinsichtlich des Zeitbedarfs für Einarbeitung, Managementaufgaben und Weiterbildung. Diese Unsicherheiten führen dazu, dass bei Neuanschaffungen die Wahl zuerst auf solche Verfahren und Techniken fällt, mit denen eine schlagkräftigere und rasch kostensenkende Produktion bei möglichst geringem Arbeitsaufwand möglich ist. PA ist dagegen eher mit schwer abschätzbaren Mehrerlösen sowie einem anfänglich höheren Managementaufwand verbunden und erfordert ein gutes informationstechnisches Verständnis.

Ökologische Wirkungen

Ökologisch positive Effekte können durch verschiedene PA-Anwendungen erzielt werden. Mit der differenzierten mineralischen Stickstoffdüngung können i. d. R. Düngereinsparungen bei gleich bleibenden oder sogar höheren Erträgen erzielt werden. Auch durch die teilflächenspezifische Bodenbearbeitung und Aussaat können durch die damit verbundene Verringerung des Treibstoff- und Saatgutverbrauchs positive Umweltauswirkungen erreicht werden. Die größten Reduktionen bei den Aufwandmengen ergeben sich durch die differenzierte Applikation von Pflanzenschutzmitteln. Die ausgebrachten Mengen – insbesondere bei Herbiziden – können im Durchschnitt um die Hälfte verringert werden. Der Einsatz von PA in der Bekämpfung von Unkräutern und Pilzbefall könnte auch zur Verbesserung der Wirksamkeit des Resistenzmanagements beitragen, da hierdurch eine innerhalb der Felder räumlich differenzierte Mittelanwendung möglich wäre.

Grundsätzlich könnten PA-Techniken auch zur Erbringung von Leistungen für den Arten- und Biotopschutz in der Agrarlandschaft eingesetzt werden, beispielsweise durch das gezielte Aussparen sensibler Bereiche bei der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln zum Schutz kleinräumiger Biotope in der Agrarlandschaft, die Berücksichtigung spezieller Habitatansprüche und die Einhaltung von Nutzungsauflagen (z. B. Abstandsauflagen in der Nähe von Fließgewässern).

Nachhaltigkeitspotenziale

Die Einordnung von PA in den Kontext nachhaltiger Entwicklung in der Landwirtschaft zeigt, dass PA zur Erreichung verschiedener ökologischer Nachhaltigkeitsziele gewisse Beiträge leisten kann. So ist es möglich, durch eine mineralische Düngung mit PA lokale Stickstoff- bzw. Phosphatüberschüsse abzubauen. Allerdings ist dabei zu bedenken, dass die flächenspezifischen Stickstoff- und Phosphorbilanzen reiner Ackerbaubetriebe überwiegend ausgeglichen sind und die Probleme zu hoher Stickstoff- und Phosphorsalden insbesondere in Gebieten mit regional verdichteten Tierbeständen und hohem Aufkommen an Wirtschaftsdünger auftreten. PA-Verfahren für die Ausbringung organischer Dünger sind aber erst in der Entwicklung und ändern auch nichts an der Ursache des Problems, das insbesondere aus einer regional verdichteten, intensiven Tierhaltung resultiert.

Die hohen Reduktionspotenziale beim Einsatz von PA im Pflanzenschutz zeigen, dass PA zur Erreichung des von der Agrarministerkonferenz vom März 2005 beschlossenen Ziels, den Aufwand an Pflanzenschutzmitteln in den nächsten zehn Jahren um 15 Prozent zu reduzieren, beitragen kann. Da die in Deutschland insgesamt ausgebrachte Menge an Pflanzenschutzmitteln vom Getreideanbau (auf 59 Prozent der Ackerfläche) bestimmt wird, könnte dieser Beitrag jedoch eher bescheiden ausfallen, sofern es nicht gelingt, PA-Verfahren für den Pflanzenschutzmitteleinsatz in Getreide zu entwickeln. Zwar gibt es in der Forschung entwickelte Verfahren zur teilflächenspezifischen Herbizidapplikation in Getreide, diese sind jedoch noch nicht praxisreif.

Durch die Nutzung von PA in der Bodenbearbeitung könnten grundsätzlich der Treibstoffverbrauch und die Gefahr von Bodenerosion bzw. -verdichtung verringert und so Beiträge zur Erreichung wichtiger Nachhaltigkeitsziele geleistet werden. Verglichen mit alternativen Verfahren, wie der konservierenden Bodenbearbeitung, wären die Effekte der Anwendung von PA zur räumlich differenzierten Bodenbearbeitung jedoch deutlich geringer. Allerdings ist noch unklar, ob einige positive Effekte der konservierenden Bodenbearbeitung (z. B. Förderung der Bodenfruchtbarkeit) durch den Einsatz von PA gesteigert werden könnten.

Ein weiteres Nachhaltigkeitsziel ist der Erhalt der Artenvielfalt in der Agrarlandschaft. Da der Einsatz von PA zu einer – im Sinne einer Gewannebewirtschaftung ggf. auch virtuellen – Vergrößerung der Felder genutzt werden kann, sind hierdurch unerwünschte Auswirkungen auf den Erhalt von Flora und Fauna in der Agrarlandschaft möglich. Technisch wäre es machbar, schützenswerte kleinräumige Bereiche in der Agrarlandschaft zu identifizieren und mit PA restriktiv zu bewirtschaften oder sie ganz aus der Nutzung zu nehmen. In der Praxis scheitert der Einsatz von PA zum Schutz von Biotopen jedoch daran, dass es methodisch schwierig ist, Teilflächen bestimmte Schutzziele zuzuordnen. Entsprechende einfache Einstufungssysteme für die landwirtschaftliche Praxis werden zurzeit erprobt. Hier stellt sich aber die Frage, ob es nicht einfachere und kostengünstigere Wege (z. B. spezielle Agrarumweltprogramme) gibt, um die Ziele erhöhter Lebensraumvielfalt und Artenvorkommen in der agrarisch genutzten Landschaft zu erreichen.

Für die ökologische Dimension nachhaltiger Landbewirtschaftung lässt sich zusammenfassend festhalten, dass PA verschiedene Umweltentlastungspotenziale besitzt, diese aber begrenzt sind: Erstens ist die erforderliche PA-Technik für einen großflächigen Einsatz noch nicht verfügbar (z. B. fehlen PA-Verfahren zur Herbizidapplikation in Getreide, der wichtigsten Kulturpflanze in Deutschland), zweitens stehen die PA-Verfahren in Konkurrenz zu anderen Technologien (z. B. Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung) oder Bewirtschaftungsweisen (z. B. Ökolandbau) und drittens können die bestehenden Nachhaltigkeitsdefizite der Landwirtschaft nur teilweise durch den Einsatz moderner Technik behoben werden (z. B. Nährstoffüberschüsse aufgrund regional konzentrierter intensiver Tierhaltung).

Betrachtet man die ökonomischen Wirkungen von PA, so stellt sich dies unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten kritisch dar, da von PA-Anwendungen – wie bei vielen die Effizienz steigernden Techniken – langfristig arbeitsplatzmindernde Wirkungen ausgehen können. Da der Einsatz von PA mit zunehmender Betriebsgröße wirtschaftlicher wird, könnte eine verstärkte Nutzung dieser Technologie auch zu einer Beschleunigung des Strukturwandels in der Landwirtschaft führen. In den nächsten Jahren dürften PA-Anwendungen dagegen zu einem zunächst höheren Managementaufwand führen und somit mittelfristig einen etwas höheren, mindestens aber gleichen Arbeitskräftebedarf erfordern wie die flächeneinheitliche Bewirtschaftung. Außerdem dürften durch den mit PA-Anwendungen verbundenen Bedarf an Aus- bzw. Weiterbildungskapazitäten sowie „IT-Support“ sowohl in der Landwirtschaft als auch im Dienstleistungssektor positive Arbeitsplatzeffekte verknüpft sein.

Die mit dem Einsatz von PA verbundenen positiven Beiträge zu einer ökologisch nachhaltigen Landwirtschaft und zur Sicherung und Aufwertung von Arbeitsplätzen in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum dürften insgesamt eher bescheiden ausfallen, wenn sich an den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nichts ändert oder keine speziellen Anreize für die Anwendung von PA in der Praxis geschaffen werden, da ansonsten auch zukünftig nur von einer eher geringen Diffusion von PA-Anwendungen ausgegangen werden muss. Wie groß die Beiträge

von PA zur Erreichung einer nachhaltigen Landwirtschaft insgesamt sein könnten, hängt u. a. vom Umfang bestehender feldinterner Standortheterogenitäten auf der landwirtschaftlich genutzten Fläche, den angebauten Kulturpflanzen und der Produktionsintensität ab; hierzu liegen jedoch keine Untersuchungen vor.

Handlungsmöglichkeiten: Forschung und Entwicklung

Trotz der bisherigen Forschungsanstrengungen existieren beim gegenwärtigen Stand der Technik zum teilflächenspezifischen Pflanzenbau noch verschiedene ungelöste technische, fachliche und methodische Herausforderungen, die eine rasche und breite Praxiseinführung von PA verhindern. Forschungsbedarf besteht insbesondere bei der Entwicklung von Onlineverfahren der vereinfachten Bodenanalyse, weil hierdurch die Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Grunddüngung verbessert werden kann. Bei der Weiterentwicklung von Sensorsystemen zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung erscheint es empfehlenswert, einen Schwerpunkt auf die Entwicklung von Verfahren zur Berücksichtigung von Störgrößen (z. B. Belichtungsverhältnisse) und anderen Einflüssen (z. B. Bodenwasservorrat, Pilzbefall) auf die mit Sensoren erfassbaren Pflanzenparameter zu legen. Im Pflanzenschutz besteht Forschungsbedarf zur Entwicklung geeigneter, kostengünstiger Sensoren, die in der Reihe einerseits zwischen Kultur- und Unkrautpflanzen und andererseits zwischen Unkräutern und Ungräsern hinreichend sicher unterscheiden können. Dafür geeignete Systeme befinden sich in der Entwicklung, sind aber für eine Herbizidapplikation noch nicht marktreif. Um PA-Verfahren zukünftig auch zur selektiven Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten einsetzen zu können, müssten Verfahren zur eindeutigen und kostengünstigen, automatisierten Erkennung von Pilzbefall im Anfangsstadium und praktikable Entscheidungsmodelle zur Fungizidapplikation entwickelt werden.

Der ökologische Landbau wird in bestimmten Anwendungsfeldern von der Forschung zu PA profitieren können, die gegenwärtig vorwiegend auf die Anforderungen der konventionellen Landwirtschaft ausgerichtet ist. Umgekehrt könnte jedoch auch die konventionelle Landwirtschaft aus einer Forschung zu PA Nutzen ziehen, die Anliegen des Ökolandbaus mit berücksichtigt. Dies gilt insbesondere für die Entwicklung von PA-Anwendungen zur mechanischen Unkrautregulierung und zur Ausbringung von Wirtschaftsdünger.

Zur besseren Umsetzung der mit PA-Verfahren erfassten Boden- und Pflanzenparameter in teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen wäre eine Weiterentwicklung von Modellen zur Entscheidungsfindung und von Algorithmen zur Steuerung der Applikationstechnik wünschenswert. Weiterer Forschungsbedarf besteht darin zu klären, ob der Einsatz von PA ein geeignetes Instrument wäre zur effizienten Erfüllung der umfassenden und in der Zukunft weiter steigenden Nachweis- und Aufzeichnungspflichten in der Landwirtschaft.

Handlungsmöglichkeiten: Nachhaltigkeits- und Folgenanalysen

Um verlässlichere Aussagen zu den möglichen Beiträgen von PA zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen machen zu können sind Analysen zur Abschätzung erforderlich, in welchen Regionen Deutschlands aufgrund von feldinternen Standortheterogenitäten und entsprechenden Betriebsstrukturen PA sinnvoll eingesetzt werden könnte. Forschungsbedarf besteht auch bei der Entwicklung von Szenarien zum Einsatz von PA (in Deutschland und der EU) unter zukünftigen agrarpolitischen Rahmenbedingungen und zur Abschätzung der damit verknüpften ökonomischen, agrarstrukturellen, ökologischen und sozialen Folgewirkungen auf sektoraler Ebene. Das Grundproblem von Nachhaltigkeitsabschätzungen landwirtschaftlicher Maßnahmen dagegen ist PA-unspezifisch und ein übergreifendes Forschungsdesiderat: Hier bedarf es der Weiterentwicklung geeigneter Kenngrößen, Ziele und Indikatoren zur Messung nachhaltiger ökonomischer und sozialer Entwicklung in der Landwirtschaft.

Einfluss der Agrarpolitik auf die Diffusion von PA

Die Liberalisierung der Agrarmärkte und die vollständig von der Produktion entkoppelten Direktbeihilfen führen tendenziell zu sinkenden Preisen für Agrarprodukte und teilweise zu geringeren Betriebseinkommen bei gleichzeitig eher steigenden Preisen für Betriebsmittel. In diesem zunehmend schwierigen wirtschaftlichen Umfeld sind die Landwirte an der Erschließung neuer, lukrativerer Absatzmärkte (z. B. Erzeugung von Bioenergie) sowie an Techniken und Verfahren interessiert, die zu einer Senkung der Produktionskosten oder einer Erhöhung der Arbeitsleistung und damit zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit führen. Vor diesem Hintergrund sehen gegenwärtig viele Betriebe davon ab, in neue Techniken wie PA zu investieren, da diese einen zusätzlichen Kapitaleinsatz und anfänglich einen erhöhten Managementaufwand erfordern und nur bedingt zur raschen Verbesserung der Betriebseinkommen beitragen können.

Dennoch könnte der Einsatz von PA als IT-basiertes landwirtschaftliches Managementsystem zukünftig auf größeres Interesse stoßen, weil PA zur Erfüllung umfassender und möglicherweise weiter steigender Dokumentationspflichten herangezogen werden kann und weil mit PA Kostensenkungs- und Ertragssteigerungspotenziale identifiziert und realisiert werden können. Des Weiteren könnten PA-Techniken auch in arbeitssparende, extensivere Anbauverfahren (z. B. teilflächenspezifische Bearbeitungsintensität oder -tiefe bei der konservierenden Bodenbearbeitung) integriert werden, was bei ausreichend niedrigen Anschaffungspreisen zu wirtschaftlichen Vorteilen insbesondere für große Betriebe führen könnte. Wenn außerdem zukünftig PA-Techniken angeboten würden, die weitestgehend eine Automatisierung der PA-spezifischen Arbeitsabläufe gewährleisten, so könnten diese Techniken auch unter zunehmendem Wirtschaftlichkeitsdruck und wachsenden Anforderungen an den Umweltschutz und die Dokumentation landwirtschaftlicher Pro-

duktionsprozesse für mehr landwirtschaftliche Betriebe wirtschaftlich interessant werden.

Handlungsmöglichkeiten: Diffusion von PA

Das Wissen über PA sollte in der Meisterausbildung und der studentischen Ausbildung an Fachhochschulen und Universitäten fest verankert werden. Auch im Bereich der landwirtschaftlichen Beratung und Weiterbildung besteht Bedarf an Förderung der Kenntnisse über PA. Die Diffusion von PA könnte z. B. durch einen Investitionszuschuss für innovative Produktionsverfahren gefördert werden. Außerdem könnten die Verbreitung und dauerhafte Etablierung von PA-Anwendungen sowohl durch Maßnahmen zur Verteuerung umweltbelastender Betriebsmittel als auch durch entsprechende Vorschriften zum Umgang mit diesen Betriebsmitteln bzw. zur räumlich und zeitlich differenzierten Dokumentation der Maßnahmen gefördert werden.

I. Einleitung

Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung hatte im Juni 2003 beschlossen, das TAB mit einem TA-Projekt zum Thema „Moderne Agrartechniken und Produktionsmethoden – ökonomische und ökologische Potenziale“ zu beauftragen. Aufbauend auf einem Vorschlag des Ausschusses für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft sowie Anregungen aus dem Berichterstatterkreis, sollte in diesem TA-Projekt untersucht werden, welche Beiträge moderne Agrartechniken und Produktionsmethoden für eine nachhaltige Landbewirtschaftung leisten können.

Das TA-Projekt gliedert sich in zwei Teilbereiche: Zum einen sollte die Untersuchung im Bereich „Precision Agriculture“ ansetzen und die damit verbundenen innovativen agrartechnischen Entwicklungen und Anwendungen untersuchen. Zum anderen sollte die Nutzung alternativer Kulturpflanzen (z. B. Leindotter) und Anbauverfahren (z. B. Mischfruchtanbau bei Körnerfrüchten) betrachtet werden. Zielsetzung beider Berichte ist es, den aktuellen Stand der Forschung und Entwicklung darzustellen sowie die Potenziale und Perspektiven hinsichtlich einer nachhaltigen Entwicklung in der Landwirtschaft aufzuzeigen. Darüber hinaus sollten die politischen Gestaltungsmöglichkeiten in der Forschungs- und Technologiepolitik, der Agrarumweltpolitik sowie der agrarpolitischen Rahmenbedingungen dargestellt werden.

Der Bericht zu „alternativen Kulturpflanzen und Anbauverfahren“ wurde bereits vorgelegt (TAB 2005). Es wurde ein Überblick zur Nutzung alternativer Kulturpflanzen und Anbauverfahren in der Erzeugung von Nahrungsmitteln als auch nachwachsender Rohstoffe zur stofflichen oder energetischen Nutzung erarbeitet und darauf aufbauend untersucht, welche davon geeignet sind, im Rahmen einer nachhaltigen Landwirtschaft in Deutschland unter den Bedingungen der Neuausrichtung der europäischen Agrarpolitik neue ökonomische und ökologische Potenziale zu erschließen.

Der vorliegende Bericht zu „Precision Agriculture“ bildet den zweiten Teil der abschließenden Berichterstattung zum TA-Projekt „Moderne Agrartechniken und Produktionsmethoden – ökonomische und ökologische Potenziale“.

1. Zielsetzung

Neben dem integrierten Pflanzenschutz, der angepassten Düngung und der konservierenden Bodenbearbeitung wird zunehmend auch Precision Agriculture als ein Weg zur nachhaltigen Entwicklung der konventionellen Landwirtschaft in Deutschland angesehen. Precision Agriculture zielt darauf ab, pflanzenbauliche Maßnahmen räumlich differenziert an den jeweiligen Zustand des Standorts und des Pflanzenbestands anzupassen und so die Umweltbelastungen durch landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen zu verringern, begrenzte Ressourcen zu schonen und die Wirtschaftlichkeit der Betriebe zu verbessern. Erwartet wird, dass Precision Agriculture insbesondere zu nennenswerten Einsparungen bei Dünge- und Pflanzenschutzmitteln führen wird oder durch bessere Ausschöpfung des Produktionspotenzials von Standort und Pflanzenbestand Mehrerträge und damit eine höhere Effizienz landwirtschaftlicher Produktion erreicht werden können.

Im TA-Teilprojekt „Precision Agriculture“ (PA) wurden, ausgehend von einer Erhebung des aktuellen Stands und der Perspektiven in Forschung und Entwicklung, die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen von PA-Techniken abgeschätzt und die Akzeptanz von PA bzw. die Faktoren, die die Diffusion von PA hemmen, dargestellt. Danach wurden die PA-Anwendungen in den Kontext einer nachhaltigen Entwicklung der deutschen Landwirtschaft eingeordnet. Abschließend wurden Handlungsmöglichkeiten in den Bereichen Forschung und Entwicklung aufgezeigt. Des Weiteren wurden der Einfluss agrarpolitischer Rahmenbedingungen auf die Verbreitung und Nutzung von PA diskutiert sowie Wege zur Förderung der Diffusion von PA aufgezeigt.

2. Vorgehensweise

Im Herbst 2003 wurde das TA-Projekt über Stand und Perspektiven des Einsatzes moderner Techniken und Produktionsmethoden in der Landwirtschaft begonnen. Aufgrund der Breite des Themenfeldes fokussierte das TAB die Fragestellung auf den Einsatz von modernen Verfahren und Techniken in der pflanzenbaulichen Produktion. Im Mittelpunkt des Projekts steht die innovative Entwicklung der PA.

Weil der ökologische Landbau nach Meinung verschiedener Interessensgruppen und Wissenschaftler am ehesten den Vorstellungen einer nachhaltigen Landwirtschaft entspricht und deshalb eine besondere Förderung erfahren hat, sollte im Rahmen dieses TA-Projekts auch gezielt untersucht werden, wie die Technikentwicklung und der Technologiebedarf im ökologischen Landbau aussehen und welchen Beitrag PA hier zu einer nachhaltigen Entwicklung der Landbewirtschaftung leisten kann. In der

Anfangsphase des TA-Projekts wurden deshalb zwei Gutachten zum Thema „Technologiebedarf und Technikentwicklung im ökologischen Landbau“ vergeben:

– „Technologiebedarf und Technikentwicklung im ökologischen Landbau“ an Prof. Dr. J. Hahn, Dr. H. Hoffman, Dr. J. Borgman; Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin;

– „Expertenbefragung zum Technologiebedarf und zur Technikentwicklung im ökologischen Landbau“ an Dr. U. Zerger, M. Zehr; Stiftung Ökologie & Landbau, Bad Dürkheim.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden im TAB-Hintergrundpapier Nr. 12 veröffentlicht (TAB 2004).

Der Untersuchungsbereich „Precision Agriculture“ wurde in vier Themenbereiche strukturiert, die über die folgenden Gutachten erschlossen wurden:

– „Stand und Perspektiven von Precision-Agriculture-Techniken“ an Dr. D. Ehlert, Dr. habil. K.-H. Dammer, Dr. H. Domsch, Dr. E. Kramer, Dr. H.-R. Langner, Dipl.-Ing. J. Schwarz, Dipl.-Ing. (FH) K. Witzke, Dipl.-Ing. R. Adamek, ATB – Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Abteilung Technik im Pflanzenbau, Potsdam;

– „Ökonomische Aspekte von Precision Agriculture“ und „Auswirkungen von Precision Agriculture auf Natur und Umwelt“ an Dr. O.A. Strecker, Dr. sc. agr. Ch. Kliebisch, AFC Consultants International GmbH, Bonn; Prof. Dr. Dr. h. c. Alois Heißenhuber, Dipl.-Ing. agr. Markus Gandorfer, Dr. rer. nat. Andreas Meyer-Aurich, Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues, TU München, Freising-Weihenstephan;

– „Einordnung von Precision Agriculture in Strategien zur Erreichung einer nachhaltigen Landwirtschaft“ an Dr. A. Werner, Prof. Dr. O. Christen, Müncheberg/ Markkleeberg.

Auf der Basis dieser vier Gutachten ist vom TAB der vorliegende Teilbericht „Precision Agriculture“ erstellt worden. Viele Literaturverweise wurden aus den Gutachten übernommen. Eine Kommentierung des Berichtsentwurfs durch die Gutachter ist erfolgt. Den Gutachterinnen und Gutachtern sei herzlich für ihre Arbeit und ihre Kooperationsbereitschaft gedankt. Die Verantwortung für die Auswahl und Interpretation der Ergebnisse aus den Gutachten liegt ausdrücklich bei den Autoren des vorliegenden Berichtes.

3. Aufbau des Berichtes

Im Kapitel II – Definition und Komponenten – wird erläutert, in welchem Kontext die Entwicklung von PA erfolgt. Dabei wird auf die Betriebsstrukturen, die Arbeitsproduktivität, die Wettbewerbsfähigkeit und die Umweltprobleme der Landwirtschaft sowie die Fortschritte in der Informationstechnik eingegangen. Anschließend werden die verschiedenen Definitionen von PA vorgestellt und begründet, warum PA als teilflächenspezifische Bewirtschaftung betrachtet wird. Nach einem Überblick über die grundsätzlichen Verfahrensschritte bei der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung werden die Datenerfassung, das Datenmanagement sowie die Entscheidungsfindung und schließlich die Applikations- und Navigationstechnik ausführlich dargestellt. In Abhängigkeit von der zeitlichen Beziehung zwischen Informationsgewinnung und Bewirtschaftungsmaßnahme wird zwischen Offline- und Onlineverfahren unterschieden, und es werden deren unterschiedlichen Anforderungen an die einzelnen Verfahrensschritte aufgezeigt.

Kapitel III gibt einen Überblick über die Anwendungsfelder von PA von der Bodenbearbeitung über die Aussaat, die Düngung, den Pflanzenschutz und die Ernte bis zur automatischen Spurführung. Dabei werden sowohl solche Verfahren behandelt, die bereits eine gewisse Verbreitung in der Praxis gefunden haben, als auch Anwendungen, die sich noch im Stadium der Forschung und Entwicklung befinden. Anschließend werden die Einsatzmöglichkeiten von PA für eine umfassende, detaillierte Dokumentation der landwirtschaftlichen Produktion diskutiert sowie der Stand der nationalen, europäischen und außereuropäischen Forschung im Bereich PA dargestellt.

Im Kapitel IV werden die ökonomischen Wirkungen von PA behandelt. Zunächst werden die Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von PA dargestellt und quantifizierbare Kostenpositionen aufgeführt, um eine Einschätzung ihres Gewichts in der Wirtschaftlichkeitsanalyse von PA-Verfahren zu ermöglichen. Es folgt eine Darstellung des möglichen Nutzens von PA-Anwendungen aufgrund von Betriebsmitteleinsparungen oder Mehrerträgen für die relevanten Anwendungsfelder von PA. Danach werden auf der Basis dieser Informationen und der Annahme plausibler Werte für Kosten- und Nutzenpositionen Modellrechnungen vorgestellt, die darüber Aufschluss geben sollen, ab welcher Betriebsgröße bestimmte PA-Anwendungen wirtschaftlich wären. Des Weiteren wird in diesem Kapitel die Frage nach der Akzeptanz von PA in der Landwirtschaft behandelt.

Die ökologischen Wirkungen von PA werden im Kapitel V untersucht. Zunächst werden die Umweltentlastungspotenziale abgeschätzt, die als Folge der Nutzung von PA-Technologien bei verschiedenen Bewirtschaftungsmaßnahmen auftreten können. Anschließend wird die Eignung von PA zum Resistenzmanagement bzw. zur Integration von Arten- und Biotopschutzzielen diskutiert.

Im Kapitel VI werden die Nachhaltigkeitspotenziale von PA dargestellt. Zuerst wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Nachhaltigkeitsdebatte gegeben. Dann werden die diskutierten Ziele einer nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft auf der nationalen, europäischen und außereuropäischen Ebene herausgearbeitet. Anschließend werden die im wissenschaftlichen und politischen Umfeld diskutierten ökologischen Indikatoren einer nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft dargestellt. Da die Entwicklung von Zielen und Indikatoren einer ökonomisch und sozial nachhaltigen Landwirtschaft in Deutschland noch am Anfang steht, wird die Einordnung von PA in diesen Kontext nur angerissen. Anschließend werden die

Beiträge der einzelnen PA-Anwendungen zur Verringerung von Nachhaltigkeitsdefiziten in der deutschen Landwirtschaft diskutiert. Zu den betrachteten ökologischen Nachhaltigkeitsdefiziten zählen der Stickstoffüberschuss, der Phosphatverbrauch und der Phosphateintrag in Oberflächengewässer, die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln, der Verbrauch fossiler Energieträger, die Beeinträchtigungen von Bodenfunktionen und der Verlust an Biodiversität. Bei den Auswirkungen von PA auf die ökonomisch und sozial nachhaltige Entwicklung der Landwirtschaft beschränken sich die Aussagen auf Einkommens- und Beschäftigungseffekte.

Abschließend werden im Kapitel VII Handlungsmöglichkeiten in den Bereichen Forschung und Entwicklung aufgezeigt. Des Weiteren werden der Einfluss agrarpolitischer Rahmenbedingungen auf die Diffusion von PA und Wege zur Förderung der Diffusion von PA diskutiert.

II. Definition und Komponenten von Precision Agriculture

Das folgende Kapitel beginnt mit einer Erläuterung des Kontextes, in dem die Entwicklung von PA erfolgt. Anschließend werden die verschiedenen Definitionen von PA vorgestellt, und es wird begründet, warum in diesem Bericht PA im Sinne einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung betrachtet wird. Nach einem Überblick über die grundsätzlichen Verfahrensschritte bei der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung werden die Datenerfassung, das Datenmanagement und die Entscheidungsfindung und schließlich die Applikations- und Navigationstechnik diskutiert. In Abhängigkeit von der zeitlichen Beziehung zwischen Informationsgewinnung und Bewirtschaftungsmaßnahme wird zwischen Offline- und Onlineverfahren unterschieden, und es werden deren unterschiedlichen Anforderungen an die einzelnen Verfahrensschritte dargestellt.

1. Kontext

Die Veränderungen in der landwirtschaftlichen Betriebsstruktur und Arbeitsorganisation, der ständige Zwang zur Erhöhung der pflanzenbaulichen Effizienz zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der Landwirtschaftsbetriebe, die steigenden gesellschaftlichen und rechtlichen Anforderungen hinsichtlich einer umweltverträglichen Landbewirtschaftung sowie die allgemeinen Fortschritte in der Informationstechnik stellen wesentliche Aspekte des Kontextes dar, in dem die Entwicklung von teilflächenspezifischen Bewirtschaftungskonzepten bzw. PA erfolgt.

Wandel der Betriebsstrukturen

Die Agrarstruktur in Deutschland unterlag in den letzen Jahrzehnten einem deutlichen Wandel. Im früheren Bundesgebiet hat der Strukturwandel zu einer wachsenden Konzentration der landwirtschaftlichen Produktion in immer weniger Betrieben geführt. Bewirtschafteten im Jahr 1949 noch rund 1,79 Millionen Betriebe (früheres Bundesgebiet) eine Fläche von 13,3 Mio. ha, so gab es in Deutschland (gesamt) im Jahr 2004 nur noch rund 372 000 landwirtschaftliche Betriebe, die eine Fläche von insgesamt rund 17 Mio. ha bewirtschafteten (Bundesregierung 2005; Statistisches Bundesamt 2003).

Die Folge dieser Entwicklung sind zunehmende Betriebsgrößen. Die durchschnittliche Flächenausstattung je Betrieb (ab 2 ha landwirtschaftlicher Fläche [LF]) betrug im Jahr 2004 mehr als 45 ha, dagegen im Jahr 1949 nur 9,6 ha. Die Haupterwerbsbetriebe, die rund 77 Prozent der LF bewirtschaften, verfügten 2004 über eine durchschnittliche Betriebsgröße von 51,4 ha LF. Betrachtet man das frühere Bundesgebiet und die neuen Länder getrennt, dann ergibt sich eine Durchschnittsgröße je Betrieb (ab 2 ha LF) im Jahr 2001 im früheren Bundesgebiet von 29,1 ha LF und in den neuen Ländern von 197,2 ha LF (Bundesregierung 2005; Statistisches Bundesamt 2003). Die Wachstumsschwelle, unterhalb derer die Zahl der Betriebe abnimmt bzw. oberhalb derer sie zunimmt, liegt für das Jahr 2004 bei etwa 75 ha LF (Bundesregierung 2005). Dies bedeutet, dass der Trend zu immer weniger Betrieben mit immer größerer Betriebsfläche ungebrochen weitergeht. Mit der steigenden Flächenausstattung der landwirtschaftlichen Betriebe ist oftmals auch eine zunehmende Größe der bewirtschafteten Felder verbunden.

Die einzelbetriebliche Flächenaufstockung erfolgt überwiegend über die Zupacht von meist durch Betriebsaufgaben verfügbar gewordenen Flächen. Tendenziell verringert sich dadurch der Anteil der „Eigenflächen“, währenddessen der Anteil an Pachtflächen immer größere Bedeutung gewinnt. Diese Entwicklung zeigt der seit Jahren steigende und inzwischen schon recht hohe Pachtflächenanteil an den bewirtschafteten Flächen: Gegenwärtig (2004) liegt dieser in Deutschland bei durchschnittlich rund 64 Prozent und in den neuen Ländern bei rund 85 Prozent (BMVEL 2004a). Die Folge dieser Entwicklungen ist, dass die Landwirte einen zunehmenden Anteil von Flächen bewirtschaften, deren feldspezifische Besonderheiten, Bewirtschaftungshistorie und Abgrenzungen homogener Teilbereiche innerhalb eines Feldes ihnen kaum bekannt sind. Die verstärkte Erledigung von Arbeitsgängen durch landwirtschaftliche Dienstleister oder Lohnarbeitskräfte kann darüber hinaus ebenfalls zu Informationsdefiziten über Standortheterogenitäten führen.

Mit zunehmenden Feldgrößen erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten unterschiedlicher natürlicher Standortbedingungen innerhalb eines Feldes. Daraus darf aber nicht geschlussfolgert werden, dass kleinere Felder generell homogener sind. Entscheidend für eine hohe Variabilität sind große Standortunterschiede (z. B. Sand- und Tonbereiche oder trockene Kuppen und vernässte Senken) innerhalb eines Feldes. Diese können auch innerhalb kleiner Felder auftreten. So ergab beispielsweise eine Untersuchung von Feldern in Flandern mit einer durchschnittlichen Feldgröße von 1,7 ha, dass auch diese für eine örtlich differenzierte Bewirtschaftung genügend heterogen sind (van Meirvenne 2003, nach Ehlert et al. 2004, S. 20). Allerdings liegen keine flächendeckenden Informationen für Deutschland über die Heterogenität von landwirtschaftlich genutzten Flächen vor.

Erhöhung der Arbeitsproduktivität und der Produktionsanforderungen

In den letzten 50 Jahren hat sich die Zahl der in der Landwirtschaft Beschäftigten drastisch reduziert. Da die landwirtschaftlich genutzte Fläche sich im gleichen Zeitraum nur unwesentlich verringerte, sank die Zahl der Arbeitskräfte je Flächeneinheit in ähnlich drastischer Weise. Im früheren Bundesgebiet betrug z. B. im Jahr 1970 die Anzahl der geleisteten Arbeitskräfteeinheiten (AKE) noch ca. 1,5 Millionen Im Jahre 2004 waren es nur noch ca. 0,57 Millionen AKE (Bundesregierung 2005; Statistisches Bundesamt 2003). Mit diesem Rückgang ist gleichzeitig verbunden, dass immer weniger Arbeitskräfte die Flächen bewirtschaften sowie Informationen erfassen und umsetzen müssen. Werden keine zusätzlichen Möglichkeiten zur Informationsbeschaffung eingeleitet, kann ein Rückgang der flächenspezifischen Informationsdichte eintreten (Ehlert et al. 2004, S. 19).

Mit der Steigerung der Arbeitsgeschwindigkeiten und Flächenleistungen der Landmaschinen wird dieses Problem zusätzlich verstärkt, da den menschlichen Wahrnehmungsmöglichkeiten und Merkfähigkeiten zur Berücksichtigung kleinräumig variierender Produktionsbedingungen Grenzen gesetzt sind. Vor allem aber können auf großen Flächen wegen fehlender Orientierungsmöglichkeiten ortsspezifische Merkmale nur unzureichend berücksichtigt werden (Ehlert et al. 2004, S. 19 f.).

Gleichzeitig steigen die Anforderungen der „guten fachlichen Praxis“ im Pflanzenbau. So sollen beispielsweise im integrierten Landbau die verschiedenen Ackerbau-, Pflanzenernährungs- und Pflanzenschutzverfahren gut aufeinander abgestimmt werden, bei Berücksichtigung sowohl des züchterischen und technischen Fortschritts als auch der natürlichen Begrenzungsfaktoren, um einen langfristig sicheren betriebswirtschaftlichen Erfolg zu garantieren (Alsing 1993, nach Ehlert et al. 2004, S. 6). Außerdem wird davon ausgegangen, dass die Anforderungen an eine räumlich und zeitlich differenzierte Dokumentation der Bewirtschaftungsmaßnahmen zukünftig deutlich steigen werden.

Kostendruck durch internationalen Wettbewerb

Die deutsche und europäische Landwirtschaft stehen aufgrund niedriger Weltmarktpreise für Agrarprodukte und der verschiedenen Neuordnungen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) unter einem permanenten Kostendruck. Landwirtschaftliche Betriebe nutzen zur Erhaltung bzw. Verbesserung ihrer Wettbewerbsfähigkeit nicht nur das Betriebsgrößenwachstum, sondern versuchen ebenso ihre Produktionsverfahren effizienter zu gestalten.

In der Pflanzenproduktion bedeutet dies, mit unverändertem Produktionsmitteleinsatz höhere Erträge zu erzielen, oder bei gleich bleibendem Ertragsniveau zu Produktionsmitteleinsparungen zu gelangen. Die Einsparung von Betriebsmitteln, Maschinen- und Arbeitszeit ist also eine wichtige Zielsetzung in den landwirtschaftlichen Betrieben. Eine bessere Anpassung der Betriebsmittelaufwendungen an die natürlichen Gegebenheiten der Standorte und die tatsächlichen Bedürfnisse der Nutzpflanzen hat daher zunehmend an Aufmerksamkeit und Bedeutung gewonnen, um die Kosten in der Pflanzenproduktion zu senken.

Umweltpolitische Zielsetzungen

Die Landwirtschaft hat über Jahrhunderte das Bild unserer Kulturlandschaft geprägt. Über die Hälfte (54 Prozent) der Gesamtfläche Deutschlands wird landwirtschaftlich genutzt. Allein daraus wird die Bedeutung der Landwirtschaft für die Umwelt deutlich. Das Verhältnis zwischen den vielfältigen Erscheinungsformen der natürlichen Umwelt und den unterschiedlichen landwirtschaftlichen Nutzungsformen basiert auf einem System komplexer Interdependenzen. Die in der Landwirtschaft angewandten Anbauverfahren stehen jedoch nicht immer im Einklang mit der Bewahrung der Schutzgüter Boden, Wasser und Luft. Die Landwirtschaft ist vielmehr ein wichtiger Verursacher von Belastungen der Ökosysteme und der Reduzierung der Biodiversität.

Die nationalen Stickstoffbilanzsalden befinden sich auf einem Niveau, das mit mehr als 100 kg N/ha/Jahr den aus umweltpolitischen Gesichtspunkten akzeptablen Wert deutlich übersteigt. Bei den phosphathaltigen Düngern werden die Politiken zur Begrenzung von Phosphateinträgen in Oberflächengewässer trotz abnehmendem Verbrauch als unzureichend beurteilt. Der Pflanzenschutzmitteleinsatz in der Landwirtschaft stagniert auf hohem Niveau. Hinsichtlich der Auswirkungen der Landwirtschaft auf den Arten- und Biotopschutz wird – neben der im Durchschnitt nach wie vor hohen Produktionsintensität – zunehmend die Aufgabe von bestimmten landwirtschaftlichen Nutzungsformen beklagt, die für bestimmte Pflanzen- und Tierarten von besonderer Bedeutung sind. Schließlich führt die Landbewirtschaftung teilweise zu Beeinträchtigungen der natürlichen Bodenfunktionen beispielsweise durch Bodenverdichtungen und -erosion sowie durch den Eintrag von Nährstoffen und Pestizidrückständen (SRU 2004).

Umweltpolitische Zielsetzungen sind seit einiger Zeit integrierter Bestandteil der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) der EU ebenso wie der agrarpolitischen Gestaltung auf Bundes- und Länderebene. Eine umweltverträglichere Gestaltung von pflanzenbaulichen Produktionsprozessen stellt daher eine kontinuierliche Aufgabe für die Landwirtschaft dar.

Fortschritte der Informationstechnik

Mit der zivilen Nutzbarkeit satellitengestützter Ortung, vorrangig in Form des zunächst militärisch ausgelegten Globalen Positionierungssystem (GPS) der USA, bestand seit Beginn der 1990er Jahre die Möglichkeit, bei der Messung raumbezogener Größen, etwa zur landwirtschaftlichen Flächennutzung, die Verortung relativ günstig und mit hoher Genauigkeit vorzunehmen. Damit war eine entscheidende Grundlage für die technische Realisierung von teilflächenspezifischen Bewirtschaftungskonzepten gegeben (Stafford/Ambler 1994). Mit der Nutzung von Ortungssystemen zur Fahrzeugnavigation – um eine verbesserte Führung von Landmaschinen zu erreichen – wird darüber hinaus ein weiteres Anwendungsfeld erschlossen.

Wichtige Voraussetzungen für die Entwicklung von PA waren darüber hinaus Verbesserungen bei sensorbasierten Systemen zur Datenerfassung sowie der allgemeine Fortschritt in der Informations- und Kommunikationstechnik. Dazu gehört u. a. die Verfügbarkeit von leistungsfähigen Personalcomputern, die große Datenmengen verarbeiten und speichern können, die Entwicklung von Geografischen Informationssystemen (GIS), die Fortschritte bei Bildverarbeitungsprogrammen und Neuentwicklungen bei der elektronischen Maschinensteuerung. Diese Innovationen haben in der Regel zunächst außerhalb der Landwirtschaft stattgefunden und sind dann für landwirtschaftliche Nutzungen angepasst und weiterentwickelt worden.

2. Definition

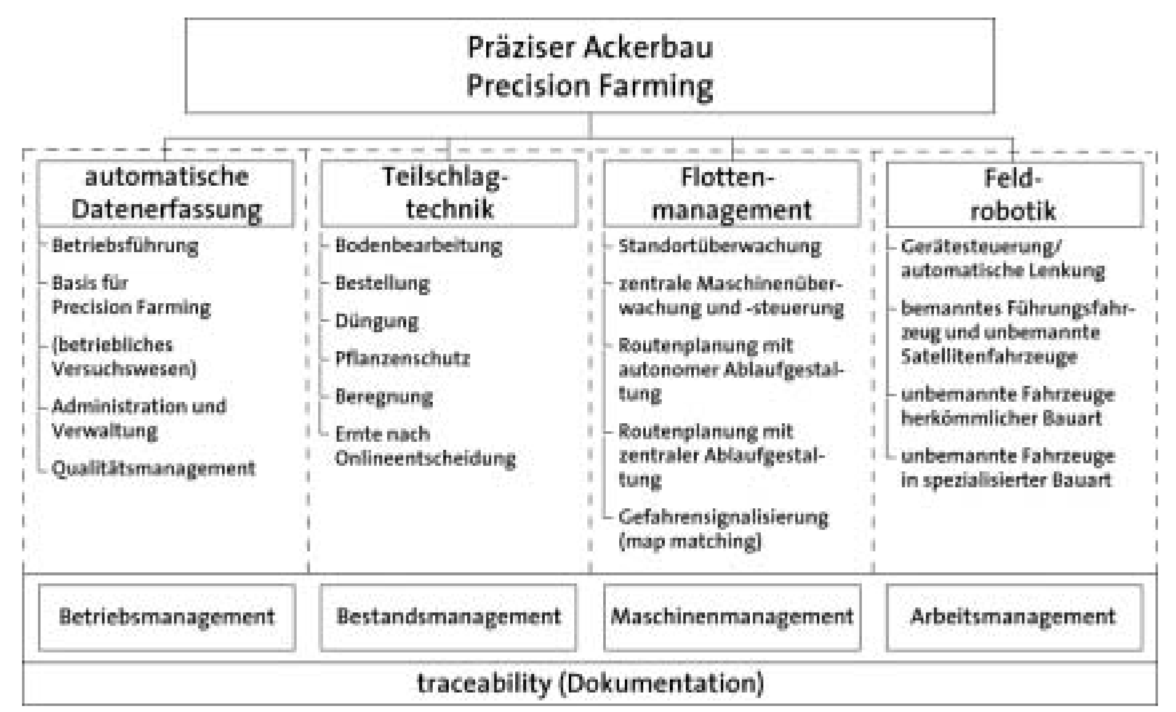
Die Entwicklung von PA seit Beginn der 1990er Jahre basiert im Wesentlichen auf einem Zusammenwirken von satellitengestützten Positionierungs-, Geoinformationssystemen sowie Neuentwicklungen in den Bereichen Sensortechnik und Maschinensteuerung. Mit Kombinationen dieser Technologien soll eine Optimierung der Pflanzenproduktion erreicht werden, von der Anbauplanung über die Bodenbearbeitung, Aussaat und Düngung sowie den Pflanzenschutz bis hin zur Ernte.

Neben der Bezeichnung „Precision Agriculture“ existieren zahlreiche weitere Bezeichnungen, die synonym zu PA verwendet werden oder starke Überschneidungen aufweisen. Im deutschsprachigen Raum werden Begriffe wie teilflächenspezifische Bewirtschaftung, Teilflächenbewirtschaftung, kleinräumige Bestandsführung und lokales Ressourcenmanagement verwendet. Im englischsprachigen Raum sind Begriffe wie „precision farming“, „site-specific farming“, „farm by the foot“, „spatially-variable crop production“ und „grid farming“ gebräuchlich. Alle diese Begriffe werden an Stelle von PA verwendet oder enthalten Kernaspekte daraus (Ehlert et al. 2004, S. 22). Eine präzise und weitgehend anerkannte Definition von PA gibt es dementsprechend nicht.

PA wird allerdings zunehmend als „Ausgangspunkt und zukünftig wesentliche Teilmenge der sich allgemein abzeichnenden informationsgeleiteten Pflanzenproduktion“ verstanden (Werner/Jarfe 2002, nach Ehlert et al. 2004, S. 3). Demzufolge wird PA nicht ausschließlich als Technologie zur Berücksichtigung von Standortunterschieden betrachtet. Vielmehr werden Fragen der gesamten Prozesskettengestaltung, des Informationsmanagements und des Umwelt- und Naturschutzes mit einbezogen (Werner/Jarfe 2002, nach Ehlert et al. 2004, S. 22). Dergestalt stellt die informationsgeleitete Pflanzenproduktion langfristig ein komplexes, EDV-gestütztes Managementsystem für den gesamten landwirtschaftlichen Betrieb dar (Auernhammer 2004; Werner/Christen 2004). Dieses beinhaltet die Bereiche Betriebsmanagement durch automatische Datenerfassung, Bestandsmanagement mit entsprechender teilflächenspezifischer Bewirtschaftung, Maschinenmanagement in Form eines Flotten- und Arbeitsmanagements durch den Einsatz von Feldrobotik und deren Dokumentation (Abb. 1).

Abbildung 1

Teilbereiche des Präzisen Ackerbaus



Quelle: nach Auernhammer 2002, geändert

In diesem Bericht wird der Schwerpunkt auf die teilflächenspezifische Bewirtschaftung gelegt und diese vereinfachend mit PA gleichgesetzt, da erstens nach verbreiteter Auffassung die teilflächenspezifische Bewirtschaftung den Kernbereich von PA darstellt und zweitens nur mit einem so abgegrenzten Untersuchungsbereich die Bearbeitbarkeit des TA-Teilprojekts gewährleistet werden konnte. Unter teilflächenspezifischer Bewirtschaftung versteht man ein Managementsystem zur Produktion von pflanzlichen Erzeugnissen unter Berücksichtigung kleinräumig vorhandener Heterogenitäten bei Boden- und Pflanzenparametern (Ehlert 1994, nach Ehlert et al. 2004, S. 23). Bereits die Nutzung einzelner PA-Komponenten (z. B. die Ertragskartierung) wird als teilflächenspezifische Bewirtschaftung bezeichnet. Häufig werden jedoch mehrere Module miteinander kombiniert (z. B. Ertragskartierung und teilflächenspezifische Stickstoffdüngung).

3. Verfahren und Komponenten – Ein Überblick

Das Grundprinzip von PA besteht darin, die Bewirtschaftungsmaßnahmen an den kleinräumigen Gegebenheiten auf der Anbaufläche auszurichten. Bestehen beispielsweise innerhalb eines Feldes signifikante Unterschiede in der Nährstoffversorgung des Bodens, in der Verteilung des Unkrautvorkommens oder im Krankheitsbefall der Pflanzen, so sollen die Düngung bzw. die Pflanzenschutzmaßnahme an diese Heterogenitäten präzise angepasst werden. Voraussetzung für solche teilflächenspezifischen Maßnahmen ist, dass die Heterogenitäten des Standorts bzw. des Kulturpflanzenbestands erfasst und in entsprechend differenzierte Maßnahmen umgesetzt werden können. Die grundsätzlichen Arbeits- bzw. Verfahrensschritte von PA-Anwendungen sind:

- Datenerfassung,
- Datenmanagement- und Beratungssysteme auf der Basis von Entscheidungsregeln und -modellen,
- Informationsumsetzung im Sinne von Daten- und Entscheidungsanwendung in der Applikationstechnik.

In Abhängigkeit von der zeitlichen Beziehung zwischen Informationsgewinnung und Bewirtschaftungsmaßnahme lassen sich drei grundsätzliche PA-Verfahrenstypen (Tab. 1) unterscheiden:

- Offlineverfahren (Kartieransatz),
- Onlineverfahren (Sensoransatz),
- Kombination von Online- und Offlineverfahren (Sensoransatz mit Kartenüberlagerung).

Bei Offlineverfahren erfolgen die Datenerfassung, die Dateninterpretation (mit der Erstellung des Maschinenauftrags) und die Durchführung der Bewirtschaftungsmaßnahme als getrennte Arbeitsschritte. Zwischen ihnen besteht kein unmittelbarer zeitlicher Zusammenhang. Für eine teilflächenspezifische Maßnahme wird auf Daten zurückgegriffen, die bereits vor der Durchführung der Maßnahme vorliegen, etwa in Form von Bodenkarten oder Ertragskarten. Offlineverfahren sind insbesondere dann vorteilhaft, wenn der Maschinenauftrag unter Verwen-

Tabelle 1

grundsätzliche PA-Verfahrenstypen

Verfahrenstyp	alternative Bezeichnung	Voraussetzung	mögliche Anwendungsfelder
Offlineverfahren	Kartieransatz (mapping approach)	geringe räumliche und zeitliche Dynamik	N-Düngung Bodenbearbeitung Aussaat Grunddüngung Pflanzenschutz
Onlineverfahren	Sensoransatz; Echtzeitverfahren (realtime sensor approach)	hohe räumliche und zeitliche Dynamik	N-Düngung Herbizideinsatz Fungizideinsatz Wachstumsregulatoren Ertragskartierung Qualitätsbestimmung
Kombination von Online- und Offlineverfahren	Sensoransatz mit Kartenüberlagerung (realtime sensor approach with mapoverlay)	geringe bis hohe räumliche und zeitliche Dynamik	N-Düngung Herbizideinsatz Fungizideinsatz Wachstumsregulatoren

Quelle: nach Ludowicy et al. 2002, S. 11, geändert

dung von sich nur langsam verändernden Merkmalen (z. B. bestimmte Bodeneigenschaften, wie Grundnährstoffgehalte) erstellt werden kann. Zudem sind stabile Merkmale häufig für mehrere Applikationsmaßnahmen verwendbar, wodurch der Erfassungsaufwand sinkt.

Offlineverfahren werden oftmals auch als Kartieransatz („mapping approach“) bezeichnet, da hier das Feld in der Computerdarstellung in kleine Rasterzellen (bzw. Vektorpolygone) mit entsprechenden Geokoordinaten aufgeteilt wird. Jeder Rasterzelle werden die erfassten Daten zu verschiedenen Standort- und Pflanzenparametern zugeordnet. Aus ihnen wird mit Hilfe von Erfahrungen, einfachen Regeln oder geeigneten Modellen auf die notwendige Bewirtschaftungsmaßnahme geschlossen. Welche Parameter hierfür geeignet sind, ist abhängig vom Bewirtschaftungsschritt (z. B. Bodenbearbeitung, Düngung). Für die Bewirtschaftungsmaßnahme wird eine Sollwert- bzw. Applikationskarte erstellt, ein so genannter georeferenzierter Maschinenauftrag. Dieser enthält für die Landmaschine verwertbare Angaben darüber, auf welchen – durch Geokoordinaten definierten – Teilflächen sie die betreffende Maßnahme durchführen soll bzw. mit welcher Intensität die Maßnahme auf den Teilflächen auszuführen ist. Der Traktor oder Selbstfahrer ist mit einem Positionierungssystem ausgerüstet, um seine eigene Position auf dem Feld bestimmen und den georeferenzierten Maschinenauftrag ausführen zu können.

Beim Onlineansatz erfolgen die Datenerfassung (Messwertaufnahme), die Datenauswertung (Sollwertanpassung) und die Durchführung der Maßnahmen nahezu zeitgleich auf der Landmaschine (Abb. 2). Dies bedeutet, dass die relevanten Parameter (etwa ein Nährstoffbedarf) direkt auf dem Feld erfasst und die entsprechenden Maßnahmen (die Applikation eines Düngers) unmittelbar daran gekoppelt ausgeführt werden. Da Sensoren zur Datenerfassung genutzt werden, wird teilweise auch vom Sensoransatz gesprochen.

Beim Onlineansatz besteht keine prinzipielle Notwendigkeit, die Werte zu georeferenzieren, d. h. eine Merkmalskarte zu erstellen. Für die Bestimmung der notwendigen Bewirtschaftungsmaßnahme werden in erster Linie Daten zu relevanten Parametern des Kulturpflanzenbestands herangezogen, etwa die aktuelle Nährstoffversorgung der Pflanze. Onlineverfahren sind besonders geeignet für Maßnahmen, die auf sich zeitlich schnell verändernde Boden- und Pflanzeneigenschaften (z. B. die Stickstoffversorgung der Pflanzen oder den Grad der Verunkrautung) reagieren.

Die Kombination von Offline- und Onlineverfahren wird auch als Sensoransatz mit Kartenüberlagerung bezeichnet. Sie zielt darauf ab, die Vorteile beider Verfahren zu vereinen. Über die Eignung des jeweiligen Verfahrens entscheidet neben der geplanten Bewirtschaftungsmaßnahme die verfügbare PA-Technik.

Abbildung 2



Arbeitsweise einer Pflanzenschutzmittelspritze (Onlineverfahren)



Quelle: Ehlert et al. 2004, S. 24

4. Datenerfassung

Für teilflächenspezifische Maßnahmen in Offline- und auch in kombinierten Offline-/Onlineverfahren (Tab. 1) müssen Daten zur kleinräumigen Ausprägung relevanter Standort- bzw. Pflanzenparameter vorliegen, aus denen die vor der Bewirtschaftungsmaßnahme zu erstellenden georeferenzierten Maschinenaufträge (Applikationskarten) abgeleitet werden können. Diese Daten können auf mehreren Wegen bzw. aus verschiedenen Quellen gewonnen werden (Tab. 2). Zum einen können bereits vorliegende, georeferenzierte Daten („thematische Karten"), z. B. Bodenkarten und Fernerkundungsaufnahmen, genutzt werden. Zum anderen können solche thematischen Karten auch vom Landwirt selbst erstellt werden, indem die relevanten Merkmale erfasst und mittels satellitengestützten Positionierungssystems in eine Kartendarstellung überführt werden. Satellitengestützte Positionierungssysteme ermöglichen es, den Messwerten Raumkoordinaten zuzuordnen. Diese bilden den Primärbezug für alle Messwerte. So sind bei aufeinander folgenden Messungen des gleichen Merkmals wie auch bei Messungen verschiedener Merkmale alle Messwerte einem Punkt auf der Ackerfläche zugeordnet. Daher ist die satellitengestützte Ortung ein wesentlicher Bestandteil von Offlineverfahren.

Bezug vorhandener Daten für Offlineverfahren

Bodenkarten

Eine wichtige Datengrundlage für teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen im Offlineverfahren stellen Bodenkarten dar. Auf der Grundlage des Gesetzes zur Schätzung der Kulturböden von 1934 wurden bis 1955 alle Böden in Deutschland untersucht und nach einem einheitlichen Schema bewertet. Die für die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche Deutschlands vorliegenden Bodenschätzkarten liefern im Maßstab 1:500 Daten zu verschiedenen bodenphysikalischen Parametern (Bodenart, Zustandsstufe, Entstehungsart). Auf dieser Basis erfolgte eine Einteilung der Böden gemäß dem Ackerschätzungsrahmen in eine Ackerzahlenskala von 17 bis 100,

Tabelle 2

Übersicht Datenquellen und ihre Verwendung im Offlineverfahren

Daten	Datenquelle	Inhalt	Verwendung
Bodenschätzkarten	Finanzamt, Katasteramt	physikalische Bodenparameter, Ertragsfähigkeit	in Verbindung mit anderen Datenquellen (z. B. Düngung)
digitale Geländemodelle	Landesvermessungsamt	Relief	Bodenbearbeitung
Flurkarten	Katasteramt	Flächendokumentation	Flächendokumentation, Hintergrundkarten
Fernerkundungsdaten (Luft- und Satellitenbilder)	Landesvermessungsamt, private Unternehmen	Standortdaten, Bestandsdaten, Hintergrundkarten	Düngung, Pflanzenschutz
Klima- und Witterungsdaten	amtliche Dienste, landwirtschaftlicher Betrieb	Temperatur, Niederschlag usw.	Standorteignung, Düngung, Pflanzenschutz
Bodenleitfähigkeitsdaten	landwirtschaftlicher Betrieb	Indikator für Bodeneigenschaften	Abgrenzung von Teilflächen, Bodenbearbeitung
Bodennährstoffdaten	landwirtschaftlicher Betrieb	Nährstoffgehalte des Bodens	Düngung, Kalkung
Boniturdaten	landwirtschaftlicher Betrieb	Verunkrautung, Befallssituation, Bestandsentwicklung	Pflanzenschutz, Düngung
Bewirtschaftungsdaten	landwirtschaftlicher Betrieb	Art der Maßnahme, Zeitpunkt, Aufwandmenge usw.	Kontrolle, Dokumentation
Ertragsdaten	landwirtschaftlicher Betrieb, Lohnunternehmer	Ertrag, Kornfeuchte, Inhaltsstoffe	Aussaat, Düngung, selektive Ernte

Quelle: nach Lütticken 1996, S. 24, geändert

wobei die Ackerzahl 100 für höchste Bodenfruchtbarkeit und damit Ertragsfähigkeit steht.

Dem Vorteil eines flächendeckenden Bodenkartenwerks stehen mehrere Nachteile gegenüber. So enthalten die Karten der Bodenschätzung keine Informationen über den aktuellen Bodenzustand – wenngleich seit Beginn der Erhebungen im Jahre 1934 bis heute Ergänzungen vorgenommen wurden –, die Bodenfeuchte und Bodenverdichtungen. Zudem wurde bei der Kartenerstellung ein relativ grobes Raster von Beprobungsstellen zugrunde gelegt, woraus Interpolationsfehler resultieren. Insgesamt aber hat sich die Bodenschätzung als wertvolle Datengrundlage für PA-Maßnahmen erwiesen, insbesondere wenn zusätzlich andere Datenquellen herangezogen werden. Zurzeit wird in den Landesämtern daran gearbeitet, alle Informationen der Bodenschätzung in digitale Bodenkarten zu übertragen.

Digitale Geländemodelle

Informationen über die Ausprägung des Bodenreliefs lassen sich digitalen Geländemodellen, die bei den Landesämtern erhältlich sind, entnehmen. Die vorherrschende Genauigkeit der Höhendaten von einem halben Meter ist für die meisten PA-Anwendungen ausreichend, nicht jedoch für einige spezielle Standortinterpretationen als Grundlage für bestimmte PA-Anwendungen. Digitale Geländemodelle können beispielsweise dazu verwendet werden, Kuppen oder Senken auf einer Ackerfläche oder den lateralen Wasserfluss im reliefierten Boden zu bestimmen und gewisse Bewirtschaftungsmaßnahmen – etwa die Bodenbearbeitung – kleinräumig darauf abzustimmen.

Flurkarten

Die Flurkarten des Liegenschaftskatasters sind in erster Linie für die rechtlich verbindliche Bewirtschaftungsdokumentation von Bedeutung. Darüber hinaus ermöglichen sie auch eine erste grafische Abbildung der landwirtschaftlichen Nutzfläche, wenn z. B. die betrieblichen Feldgrenzen in die Flurkarten übertragen werden. Je nach Alter der Flurkarten gestaltet sich die Abbildung der Felder in Gebieten, in denen keine Flurbereinigung stattgefunden hat oder diese schon lange zurückliegt, schwierig. Ein Feld kann dann eine Vielzahl von Flurstücken oder auch nur Teile von Flurstücken umfassen (Lütticken 1996, S. 14).

Fernerkundungsdaten aus Satelliten- und Luftbildern

Eine weitere Datenquelle für PA sind Fernerkundungsaufnahmen von Flugzeugen oder Satelliten. Diese werden in unterschiedlichen Zeiträumen aufgenommen, bei Flugzeugen je nach Bedarf und bei Satelliten in gleich bleibenden Intervallen beim Überfliegen des betreffenden Gebiets. Satellitenaufnahmen werden in der Regel im spektralen Bereich außerhalb des sichtbaren Lichts gewonnen. Sie wurden bisher in der Landwirtschaft vor allem für die Kontrolle von Subventionsmaßnahmen und zur Ertragsprognose genutzt (Ludowicy et al. 2002, S. 75).

Um aus den Fernerkundungsaufnahmen nutzbare Daten zu Boden- und Pflanzenmerkmalen zu erhalten, müssen diese in der Regel zunächst ausgewertet werden. So kann z. B. auf Grundlage der flugzeuggestützten Ermittlung eines Vegetationsindex eine Pseudoertragskarte erstellt werden, wenn die gemessenen Merkmalswerte mit dem mittleren Flächenertrag (während oder nach der Ernte bestimmt) kombiniert werden. Allerdings zeigt die Erfahrung, dass verwertbare Bilder nur unter günstigen Wetterbedingungen (d. h. bei wolkenlosem Himmel) aufgenommen werden können. Diese sind unter mitteleuropäischen Verhältnissen eher die Ausnahme als die Regel, wenn zu einem bestimmten agrotechnischen Termin die Verhältnisse erfasst werden müssen.

Bei Satellitenaufnahmen wirken das begrenzte Zeitfenster der Überfliegung eines bestimmten Gebietes und ungünstige Wetterbedingungen als Hemmnisse für eine breite Nutzung in der Landwirtschaft. Ersatzweise kann mit Hilfe von Dienstleistungsunternehmen auf Satellitenbilder vergangener Jahre zurückgegriffen werden, auf denen die Bestände abgebildet wurden. Damit sind jedoch ebenfalls Probleme verbunden, z. B. der Umstand, dass auswertbare Bilder aus der Zeit kurz vor der Ernte ggf. nicht für alle zurückliegenden Jahre existieren. Schließlich ist die Bearbeitung der Bilder – etwa für die Ermittlung der für Düngung und Pflanzenschutz relevanten Vegetationsindizes – aufwendig und teuer.

Daneben bestehen weitere Angebote, die als Datengrundlage für teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen geeignet sein können. Dazu zählen Orthophotos, d. h. georeferenzierte, entzerrte Schwarz-Weiß-Luftbildaufnahmen, die in periodischen Abständen von mehreren Jahren von Flugzeugen aus aufgenommen werden. Als alleinige Informationsquelle sind sie zu wenig aussagekräftig, in Verbindung mit weiteren Datenquellen können sie hingegen nützlich sein. Eine eigenständige Bedeutung haben Orthophotos zur Erstellung oder Kontrolle von Feldgrenzen.

Datenerfassung mit GPS für Offlineverfahren

Nährstoffkarten

Nährstoffkarten können durch Kartierung von Messwerten aus Bodenproben gewonnen werden. Da der Nährstoffgehalt des Bodens für das Pflanzenwachstum von großer Bedeutung ist und gleichzeitig eine hohe räumliche und – im Falle des Stickstoffgehalts – zeitliche Variabilität aufweisen kann, stellen Nährstoffkarten für bestimmte teilflächenspezifische Maßnahmen eine wichtige Entscheidungsgrundlage dar. Für ihre Erstellung werden nach einem zuvor bestimmten Raster Bodenproben gezogen und im Labor untersucht. Jede Bodenprobe wird durch die Entnahme einer aus 10 bis 20 Einstichen bestehenden Mischprobe des Bodens aus dem Krumenbereich gewonnen. Die Bodenprobenahme für eine teilflächen-

spezifische Düngung erfolgt ausschließlich mit Fahrzeugen, die mit einem Positionierungssystem ausgerüstet sind. Die Position jedes Entnahmepunktes wird aufgezeichnet. Die Rasterdichte der Beprobungen sollte sich an der Heterogenität des Standorts orientieren. In der Praxis hat sich eine Rastergröße von einem Hektar durchgesetzt, wenngleich aus Kostengründen vielfach auch größere Beprobungsraster angewandt werden. Die Erstellung von Nährstoffkarten erfolgt in der Regel als Dienstleistung.

Ertragskarten

Die Ertragskartierung ist eine der derzeit am weitesten verbreiteten PA-Verfahren. Sie dient dem Zweck, Ertragsunterschiede innerhalb von Ackerflächen zu dokumentieren. Bei der Getreideernte erfolgt die Ertragskartierung mit Hilfe von Korndurchsatzsensoren (Volumen-, Kraft- oder Impulsmesssysteme) in einem Mähdrescher, der mit einem satellitengestützten Ortungssystem ausgestattet ist und den Kornertrag in eine digitale Karte überführen kann. Bei der Ertragskartierung können diverse Fehlerquellen auftreten, zu denen u. a. die unzureichende Kalibrierung der Geräte, zu hohe Fahrgeschwindigkeiten, widrige Erntebedingungen oder Lagergetreide zählen (Muhr/Noack 2002; Weltzien et al. 2002, nach Strecker et al. 2004a, S. 27).

Ertragskarten sind als Teil präziser Ackerschlagkarteien für die Anbaudokumentation des Landwirts hilfreich und dienen als Erfolgskontrolle durchgeführter Bewirtschaftungsmaßnahmen. Für teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen sind sie von Bedeutung, da sie die Heterogenität der Standortverhältnisse widerspiegeln und als Grundlage für zukünftige Bewirtschaftungsentscheidungen dienen können. Dabei besteht allerdings das Problem, von einer gemessenen Ertragsverteilung auf die Ertragsverteilung im Folgejahr zu schließen. Da die Erträge eines Feldes u. a. witterungsbedingt über die Jahre variieren, lassen sich durch die Kartierung in der Regel erst nach mehreren Jahren robuste Aussagen zur räumlichen Ertragsstruktur treffen.

Mittlerweile bieten alle Hersteller von Mähdreschern Systeme zur Ertragskartierung an. Der Marktführer Claas hat in Deutschland bislang 600 Exemplare verkauft (Werner/Christen 2004, S. 125). Der Hersteller arbeitet mit dem Prinzip der Quantimetermesstechnik, die die Menge des Druschguts durch Messung per Lichtschranke im Kornelevator ermittelt. Die zugehörigen Positionsdaten liefert ein satellitengestütztes Ortungssystem und die Ertragskarte wird durch das Programm „AGRO-MAP“ erstellt. Die Ertragskartierung im Feldhäcksler hingegen wird derzeit nur von einem Hersteller (John Deere) angeboten. Ertragskartierungssysteme für andere Erntemaschinen (Ladewagen, Rundballenpressen, Kartoffel- und Rübenernter) befinden sich größtenteils noch im Stadium der Entwicklung. Laufende Forschungsvorhaben zielen außerdem darauf ab, Onlineverfahren zur Bestimmung wertgebender Inhaltstoffe (z. B. des Proteingehalts bei Getreide oder des Zuckergehalts bei Zuckerrüben) während des Erntevorgangs bis zur Praxisreife zu entwickeln.

Bodenleitfähigkeitskarten

Vergleicht man die Nährstoff- und Ertragskarten eines Feldes miteinander, so wird deutlich, dass die kleinräumig auftretenden Ertragsunterschiede nicht gezwungenermaßen auf eine Mangelversorgung mit Nährstoffen zurückzuführen sind. Auch andere Faktoren, wie etwa die Wasserversorgung, die Bodenart und der Humusgehalt, spielen hierbei eine wichtige Rolle. Diese Größen können indirekt über die Messung der elektrischen Bodenleitfähigkeit bestimmt werden.

Die Leitfähigkeit des Bodens wird von der Bodenart (Ton-, Sand- und Schluffgehalt), dem Wasser-, Salz-, Nährstoff- und Humusgehalt sowie vorhandenen Bodenverdichtungen bestimmt. Würde man die Vielzahl der Bodeneigenschaften einzelnen erfassen wollen, entstünde dabei ein enormer Aufwand für Probenahmen, Laboranalysen und Datenauswertungen. Mit der Messung der Bodenleitfähigkeit steht ein einfacheres und kostengünstigeres Verfahren zur Erfassung von Bodeneigenschaften zur Verfügung. Außerdem ist dieses weniger von den Witterungsbedingungen abhängig als die Methoden der Fernerkundung.

Die Kartierung der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens wird in Deutschland vorrangig mit dem Gerät EM38 der Firma Geonics Limited (Kanada) durchgeführt (Abb. 3). Das zugrunde liegende Messverfahren – die Induktion eines Magnetfeldes[1] – benötigt keinen Bodenkontakt. Daher lässt sich dieses Gerät gemeinsam mit einem GPS-Empfänger auf einen fahrzeuggezogenen Schlitten montieren, wodurch Leistungen von mehr als 100 ha/Tag bei der Kartierung erreicht werden können.

Zusätzlich zur Kartierung der Bodenleitfähigkeit muss – gewissermaßen zur Eichung – eine Charakterisierung des Bodenprofils (Beschreibung der einzelnen Horizonte, der Wasserverhältnisse, des Bodentyps) vorgenommen werden. Dies geschieht durch einen Bodenkartierer unter der Nutzung von Bohrstöcken oder Profilgruben. Die bei der Bodenaufnahme hergestellten Beziehungen zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und den relevanten Bodenparametern lassen sich flächenübergreifend anwenden. Die aus der Leitfähigkeitsmessung erstellten Bodenkarten können für die Abgrenzung von Teilflächen, eine gezielte Bodenbeprobung und die teilflächenspezifische Anpassung der Bodenbearbeitungstiefe genutzt werden (Ehlert et al. 2004, S. 32 f.; Ludowicy et al. 2002, S. 59 ff.).

[1] Die mit Wechselstrom gespeiste Senderspule erzeugt ein primäres Magnetfeld, das im leitfähigen Boden einen Strom induziert. Durch die Empfängerspule wird neben dem konstanten primären auch das durch den induzierten Strom zusätzlich erzeugte sekundäre Magnetfeld gemessen. Das Verhältnis des sekundären zum primären Magnetfeld ist linear proportional zur Bodenleitfähigkeit.

Abbildung 3

Gerät EM38 zur Messung der elektrischen Bodenleitfähigkeit



Quelle: Ehlert et al. 2004, S. 32

Bonituren

Verfügt der Landwirt über ein Positionierungssystem, so kann er selbst die für ihn relevanten georeferenzierten Daten in den Nutzflächen erheben. Den geringsten technischen Aufwand erfordern manuelle Bonituren. Dabei begeht der Landwirt seine Ackerflächen mit einem mobilen Computer, der mit einem Ortungssystem sowie entsprechender Software ausgerüstet ist, und erfasst dabei die wesentlichen Parameter, etwa den aktuellen Grad der Verunkrautung. Der Nachteil dieser Methode besteht in dem hohen Arbeitsaufwand bei nur geringer Flächenproduktivität.

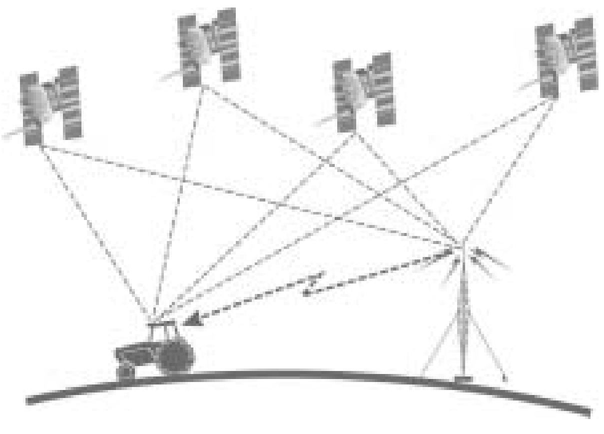
Eine hohe Flächenproduktivität kann nur mit automatisierten Bonituren von einem Fahrzeug aus erreicht werden. Ein Beispiel sind automatisierte Verfahren der Unkrauterkennung und Kartierung. Dabei können mit Hilfe von Bildauswertungstechniken durch Vergleich von Formparametern mit gespeicherten Objektparametern die Unkräuter identifiziert werden. Beim Einsatz von multispektralen Digitalkameras erfolgt eine nachgeschaltete Bildverarbeitung, die eine artenbezogene Unkrauterkennung sowie die Unterscheidung zur Kulturpflanze ermöglichen soll (Chapron et al. 1999; Gerhards et al. 2002a; Ruckelshausen et al. 1999).

Satellitengestützte Positionierungssysteme

Um die Heterogenität der Standortverhältnisse als Grundlage für teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen zu erfassen, muss der Landwirt bei Offlineverfahren über ein Positionierungssystem verfügen, das es erlaubt, den Messwerten Raumkoordinaten zuzuordnen. In der Praxis ist v. a. das „Globale Positionierungssystem“ (GPS) der USA von Bedeutung, das seit Anfang der 1990er Jahre auch für die zivile Nutzung zur Verfügung steht. Ortungsverfahren wie das GPS beruhen auf dem Prinzip der Entfernungsbestimmung durch Messung der Laufzeit von Signalen zwischen dem Nutzer und je einem von mehreren Bezugspunkten (beim GPS 24 Satelliten, die die Erde in rund 20 000 km Höhe umkreisen), deren Position genau bekannt ist. Das Satellitensignal enthält Informationen über die Position des Satelliten und die Uhrzeit, zu der er diese Position im All einnahm. Die Position des Empfängergeräts wird aus der Messung der Laufzeit der Signale verschiedener Satelliten zum GPS-Empfänger abgeleitet. Mit Hilfe von GPS-Empfangsgeräten können bei gleichzeitigem Empfang der Signale von vier Satelliten die Koordinaten jedes Orts auf der Erdoberfläche bestimmt werden (Abb. 4). Die Genauigkeit des militärisch genutzten Systems liegt bei unter 1 m, die Qualität der Signale für die zivile Nutzung lässt allerdings nur Genauigkeiten im Bereich einiger Meter zu. Die Präzision der Positionsbestimmung handelsüblicher GPS-Empfangsgeräte liegt bei einer Abweichung von 3 bis 5 m (Griffin 2004).

Abbildung 4

Prinzipieller Aufbau des differenziellen GPS



Quelle: Ostheim 2000, S. 24

Aufgrund der Ungenauigkeiten von GPS findet bei PA-Anwendungen normalerweise das „Differential Global Positioning System“ (DGPS) Anwendung. Dieses ist ein verbessertes Ortungssystem auf Basis von GPS, bei dem die GPS-Signale mit zusätzlichen Korrekturdaten von terrestrischen Sendern oder Satelliten verrechnet werden, um die Genauigkeit der Standortbestimmung zu verbessern. Das Korrektursignal übermittelt die per GPS gemessene Position des Senders, dessen Koordinaten vorliegen; die Differenz zwischen den beiden Positionen wird zur Korrektur des GPS-Signals verwendet. Tabelle 3 gibt einen Überblick über Genauigkeit, Reichweite, Vor- und Nachteile der wichtigsten DGPS-Betriebsarten.

Tabelle 3

Kenngrößen einzelner DGPS-Betriebsarten

DGPS-Methode	Genauigkeit	Reichweite	Vorteil	Nachteil
Funk (lokal)	bis 1 cm, abhängig von Basislänge	Sichtweite max. 5 bis 30 km, abhängig von Sendeleistung	hohe Genauigkeit; mobile Referenzstation, günstiger Funkmodembetrieb, mehrere Empfänger möglich	Kosten für Basis, örtlich begrenzt, Sichtkontakt zur Basis zwingend
GSM Modem (lokal)	bis 1 cm, abhängig von Basislänge	theoretisch unbegrenzt, abhängig von GSM-Netz	hohe Genauigkeit; mobile, eigene Referenzstation, Sichtkontakt nicht nötig	Kosten für Basis und Sendebetrieb, nur ein Empfänger möglich
RASANT	bis in Submeterbereich	innerhalb des Sendebereichs von UKW	keine eigene Basis notwendig	Kosten für Empfangseinheit und Nutzung des Dienstes
ALF	bis in Submeterbereich	ca. 600 km Radius um Mainflingen	keine eigene Basis notwendig, Langwelle recht zuverlässig im Empfang	Kosten für Empfangseinheit, auf Deutschland begrenzt
EGNOS	20 cm bis 2 m, je nach Satellitenzahl	europaweit	europaweite Nutzbarkeit, keine eigene Basis notwendig	braucht Sichtkontakt zum Satellit
OmniSTAR®	20 bis 70 cm	europaweit	europaweite Nutzbarkeit, keine eigene Basis notwendig	Kosten für Empfangseinheit u. Nutzung des Dienstes, braucht Sichtkontakt zum Satellit, lange Initialisierungszeit

Quelle: nach Griffin 2004, geändert

Zur Ubertragung der Korrekturdaten gibt es die Möglichkeit, das „Radio Data System“ (RDS) im UKW-Frequenzbereich zu nutzen oder fest installierte Langwellensender wie den „Accurate Positioning by Low-Frequency“ (ALF). Der vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie in Frankfurt entwickelte ALF steht in Mainflingen und wird von der Deutschen Telekom AG betrieben. Die maximale Reichweite beträgt rund 600 km mit einer Positionierungsgenauigkeit von etwa einem Meter. Beim Referenzdienst der deutschen Landesvermessung SA*POS*® werden die Referenzsignale von terrestrischen Stationen über UKW gesendet. Mit SA*POS*® werden Genauigkeiten im Meterbereich erreicht. Daneben besteht prinzipiell die Möglichkeit, eine eigene Feststation zur Bereitstellung der Referenzsignale einzurichten, was jedoch mit hohen Kosten verbunden ist (Kap. IV.2).

Als nicht erdgebundene Variante gibt es noch die satellitengestützten Dienste, zu denen das amerikanische WAAS (Wide Area Augmentation System) und OmniSTAR® gehören. Die ebenfalls über mehrere, in großen Gebieten fest installierte Referenzstationen geschätzten Korrekturdaten werden über einen geostationären Satelliten zurück zur Erde gesendet. Besteht Sichtkontakt zu diesem wie auch zu den anderen Satelliten, kann ein DGPS-Empfänger die Daten empfangen und damit eine Positionsgenauigkeit von 0,20 bis 2 m erreichen.

Die European Space Agency (ESA) baut zurzeit eine alternative Lösung zum Empfang von Korrekturdaten auf, den European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS). Das System besteht aus 34 Referenzstationen auf der Erde und sechs Satelliten im All. EGNOS soll 2006 den Regelbetrieb aufnehmen. Primäre Aufgabe ist die Versorgung der europäischen Flugsicherung mit zuverlässigen Navigationssignalen. Für die landwirtschaftliche Nutzung ist EGNOS nicht zuletzt dadurch von Interesse, weil die Korrektursignale entgeltfrei und die DGPS-Empfänger deutlich günstiger als bei anderen Angeboten sind.

Die EU hat den Aufbau eines eigenen satellitengestützten, rein zivilen Navigations- und Ortungssystems mit Namen GALILEO begonnen. Dieses soll bis 2010 aufge-

baut sein, wird eigene Frequenzen verwenden und unabhängig vom Netz der amerikanischen GPS-Satelliten arbeiten. GALILEO wird neben frei verfügbaren Ortungssignalen mit Genauigkeiten von rund vier Metern auch kommerzielle Dienste anbieten, die sehr genaue Positionsbestimmungen von weniger als einem Meter erlauben sollen, mit Hilfssendern sogar im Dezimeterbereich.

Für eine präzise satellitengestützte Standortbestimmung auf landwirtschaftlichen Flächen müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein: der Empfang von GPS-Signalen einer hinreichend großen Anzahl von Satelliten sowie von Korrektursignalen. Diese Voraussetzungen sind auf freien Flächen in der Ebene – d. h. dem größten Teil der landwirtschaftlichen Nutzfläche – relativ gut einzuhalten. Mit steigender Anzahl von Hindernissen (z. B. Berge, hoher und dichter Bewuchs, Bauwerke) werden die genannten Anforderungen jedoch schlechter erfüllt.

Die GPS- und Korrekturdaten können mit Hilfe spezieller Geräte empfangen werden. Es werden verschiedene Ausführungen von Empfangsgeräten angeboten, neben tragbaren Modellen auch solche, die auf landwirtschaftlichen Maschinen zu montieren sind. Ein Beispiel für ein Empfangsgerät ist das GEOmeter 24 der Firma GEOsat (Mülheim/Ruhr). Es besteht aus einem 12-Kanal-GPS-Empfänger mit integriertem Korrekturdatenempfänger für UKW bzw. LW. Auf landwirtschaftlichen Flächen ohne Hindernisse kann damit eine Ortungsgenauigkeit von etwa einem halben Meter erreicht werden.

Datenerfassung bei Onlineverfahren

Bei Onlineverfahren erfolgen zeitlich unmittelbar aufeinander die Datenerfassung (mittels Sensorik), die Dateninterpretation sowie die Umsetzung in pflanzenbauliche Maßnahmen. Die betreffenden Daten zu den Standort- bzw. Bestandsparametern müssen nicht georeferenziert, gespeichert und verarbeitet werden, da die Maßnahme gewissermaßen als unmittelbare Reaktion auf die Datenerfassung an Ort und Stelle erfolgt. Es muss lediglich aus den Daten auf die Ausprägung der Bewirtschaftungsmaßnahme geschlossen werden, wozu geeignete Algorithmen verwendet werden. Welche Bestandsparameter erfasst werden müssen, hängt von der Art der Bewirtschaftungsmaßnahme ab.

Sensoren zur Erfassung der Stickstoffversorgung

Die Intensität der Grünfärbung der Kulturpflanzen kann zur Beurteilung der Versorgung eines Bestands mit Stickstoff herangezogen werden. Dabei wird die vom Pflanzenbestand reflektierte Lichtmenge mit einem optoelektronischen Sensor gemessen. Für die sachgerechte Interpretation der Reflexionsdaten sind umfangreiche Eich- und Kalibrierungsversuche unter Feldbedingungen durchgeführt worden. Dieses Verfahren wird bereits in der landwirtschaftlichen Praxis angewendet (Kap. III.3). Für die erste Stickstoffgabe zu Vegetationsbeginn ist der Sensor nicht geeignet, da der Chlorophyllgehalt der Pflanze in dieser Phase aufgrund der geringen Stickstoffaufnahme im Verhältnis zum relativ hohen Stickstoffangebot des Bodens noch keine Rückschlüsse auf den Stickstoffbedarf zulässt. Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens sind gesunde und ausreichend mit Wasser und sonstigen Nährstoffen versorgte Pflanzenbestände (Ehlert et al. 2004, S. 41 f.; Ludowicy et al. 2002, S. 120 ff.).

Sensoren zur Erfassung der Verunkrautung

Optoelektronische Sensoren werden ebenso zur Unkrauterkennung verwendet. Sie basieren auf der Auswertung der Spektralbereiche Rot und nahes Infrarot, was die Unterscheidung zwischen „grüner Fläche“ (d. h. Pflanze) und „nicht grüner Fläche“ (d. h. Boden) möglich macht. Bei engreihigen Kulturen (Getreide, Raps) erfolgt die Messung in den Fahrgassen, wobei vereinfachend angenommen wird, dass die Unkrautverteilung im angrenzenden Pflanzenbestand gleich ist. Aus den Sensordaten wird der Grad der Verunkrautung abgeleitet und die Herbizidapplikation in Echtzeit gesteuert (Ehlert et al. 2004, S. 49; Ludowicy et al. 2002, S. 129 ff.). Systeme, die mehr als zwei Wellenlängen nutzen, um Unkraut von Kulturpflanzen und Boden sowie Unkrautarten untereinander zu unterscheiden, sind in der Entwicklung (Biller/Schicke 2000; Vrindts/De Baerdemaeker 1997), aber noch nicht praxisreif (Ehlert et al. 2004, S. 49).

Sensoren zur Erfassung der Pflanzenmasse

Zur Messung der Heterogenität von Pflanzenbeständen (v. a. bei Getreide) kann auch ein physikalisches Pendel als Sensor genutzt werden. Das Pendel wird beim Durchfahren von Pflanzenbeständen ausgelenkt. Die Höhe der Kraftwirkung zur Auslenkung des Pendels wird im Wesentlichen von der Masse und der Anzahl der Einzelpflanzen und somit von der auf die Fläche bezogenen Pflanzenmasse bestimmt (Ehlert et al. 2003). Dieser Pendelsensor (Marktbezeichnung: CROP-Meter) kann zur Bestimmung der Stickstoffdüngung und zur Anpassung von Fungizidaufwandsmengen an die Pflanzenbestandsdichte genutzt werden (Kap. III.3 u. III.4).

Sensoren zur Erfassung des Krankheitsbefalls

Verschiedene Sensorsysteme, die einen Krankheitsbefall der Kulturpflanzen im Anfangsstadium erkennen, identifizieren und quantifizieren sollen, befinden sich derzeit noch im Forschungsstadium. Die wichtigsten Ansätze sind die Chlorophyllfluoreszenz, die Multispektralbildanalyse und die Thermografie.

Beim Verfahren der Chlorophyllfluoreszenz soll der Sachverhalt genutzt werden, dass in Stresssituationen die Nutzung der Lichtenergie für die Photosynthese gestört und durch den damit verbundenen „Energierückstau“ die Fluoreszenz verstärkt wird. Die Erfassung der Fluoreszenz kann mit Hilfe von fahrzeuggestützten Lasersystemen erfolgen. Da neben Pilzinfektionen auch andere Stressfaktoren wie Hitze und Kälte, Trockenheit und Nährstoffmangel ursächlich sein können, sind teilweise zusätzlich zeitaufwendige Feldbegehungen notwendig,

um andere Stressursachen auszuschließen, was bisher einer Praxiseinführung solcher Systeme im Wege steht.

Bei der Analyse von Multispektralbildern werden verschiedene Wellenlängen eingesetzt, um mit Hilfe bestimmter Indizes kranke von gesunden Blättern zu unterscheiden (Anonym 2001; Jacobi et al. 2003). Bisher konnte die Funktionsfähigkeit erst zu einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium der Pilzinfektion erreicht werden, wenn es für einen Fungizideinsatz bereits zu spät ist.

Bei der Thermografie soll die Oberflächentemperatur der Blätter als Indikator für einen möglichen Pilzbefall verwendet werden. Ein Pilzbefall verändert die Transpiration, d. h. die Verdunstung von Wasser auf der Pflanzenoberfläche, was wiederum Einfluss auf die Oberflächentemperatur hat. Da diese auch von zahlreichen weiteren Faktoren – z. B. der Wasserversorgung der Pflanze – abhängig ist, müssten wiederum andere Faktoren bei der Analyse berücksichtigt werden. Hier besteht also erneut das Problem, dass der mit einem Sensor erfassbare Parameter nur ein Indikator für den relevanten Pflanzenzustand (z. B. Pilzbefall) ist und von den Sensordaten nur unter Berücksichtigung von Stör- und anderen Einflussgrößen auf die Ausgestaltung der Bewirtschaftungsmaßnahme geschlossen werden kann.

5. Datenmanagement- und Beratungssysteme

Die neuen Möglichkeiten der Datenerfassung durch Sensortechnik und Positionierungssysteme in der Landwirtschaft genügen alleine nicht, um teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen zu ermöglichen. Bei beiden Verfahren sind Datenmanagement- und Entscheidungsunterstützungssysteme notwendig, um die Daten zu interpretieren und teilflächenspezifische Applikationskarten bzw. Maschinenaufträge erstellen zu können. Hierfür ist eine Hard- und Softwareausstattung im landwirtschaftlichen Betrieb erforderlich, die diese Arbeitsschritte von der Erfassung der Daten bis zur Steuerung der Landmaschinen ermöglicht.

In Onlineverfahren werden die Informationen über relevante Merkmale des Pflanzenbestands (z. B. Stickstoffversorgung der Kulturpflanzen) von sensorbasierten Erfassungssystemen aufgenommen und mit Hilfe hinterlegter pflanzenbaulicher Regeln und Entscheidungsalgorithmen automatisch in Bewirtschaftungsmaßnahmen umgesetzt.

Bei Offlineverfahren, die auf georeferenzierte Maschinenaufträge angewiesen sind, fallen im Vergleich zur flächeneinheitlichen Bewirtschaftung wesentlich größere Datenmengen an. Jeder Datensatz enthält neben den Ortskoordinaten als Primärbezug Daten über Boden- und Pflanzenzustände, die Bearbeitungsmaßnahmen sowie Metadaten („Daten über Daten"), wie z. B. Angaben über Zeitpunkte und Methoden der Erfassung. Zudem sollen die Daten über längere Zeiträume gespeichert werden, um eine durchgehende Protokollierung aller landwirtschaftlichen Bearbeitungsschritte zu gewährleisten und Vergleiche über mehrere Jahre zu ermöglichen.

Die zu verwaltende Datenmenge wird wesentlich durch die gewählte Ortsauflösung bestimmt. Eine Auflösung von beispielsweise einem Messpunkt/m^2 – die künftig auf stark heterogenen Feldern relevant werden könnte – führt zu einer Datenbank mit 10 000 Datensätzen/ha, d. h. bei Betrieben mit mehr als 100 ha Fläche zu über einer Million Messpunkten mit einer Vielzahl von verschiedenen Messwerten (Bodendaten, Aussaatstärken, Düngungsmengen, Pflanzenschutz, Ernteerträge usw.). Daher muss die Hard- und Software in der gesamten Prozesskette grundsätzlich zur Verarbeitung großer Datenmengen hinreichend leistungsfähig sein.

Das Datenmanagement in Offlineverfahren könnte durch die Einführung von geeigneten Datenbanklösungen in Zukunft weitgehend automatisiert werden. Wichtige Leistungsmerkmale einer solchen Datenbanklösung sind die automatische Überprüfung der Eingangsdaten sowie eine effektive Kontrolle über den Zugriff auf Daten. In diesem Zusammenhang müssen in Zukunft Datenbanklösungen für das Datenmanagement in Betracht gezogen werden, die alle landwirtschaftlichen Maßnahmen ortsbezogen von der Planung über die Durchführung bis hin zur Abrechnung speichern und verwalten können. Die derzeit verfügbaren Softwarelösungen – etwa Ackerschlagdateien oder landwirtschaftliche Abrechnungsprogramme – umfassen nur einen Teil des Datenmanagements und müssen für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung in ihrem Funktionsumfang erweitert werden. Große, weltweit agierende Hersteller von Landmaschinen (z. B. von den Firmen John Deere und Claas) sowie von elektronischen Geräten und Software (z. B. von der Firma Agrocom) bieten Softwarelösungen, z. B. für die Schlagverwaltung, die Dokumentation ackerbaulicher Maßnahmen, das Flottenmanagement, die Rückverfolgbarkeit von Produkten oder die Flächenvermessung für Beihilfezahlungen, an und beziehen zunehmend die teilflächenspezifische Bewirtschaftung als integralen Bestandteil ein.

Geoinformationssysteme

Bedeutendstes Werkzeug des Datenmanagements – d. h. hier zur Verarbeitung georeferenzierter Daten im landwirtschaftlichen Betrieb – sind Geoinformationssysteme (GIS), die in der Regel auf Betriebscomputern installiert sind. Ein GIS ist ein Computersystem zur Erfassung, Verwaltung, Analyse und Darstellung großer Mengen räumlich verorteter Daten und darauf bezogener thematischer Attribute (Ludowicy et al. 2002, S. 81).

Das GIS bietet die Möglichkeit, Positionsangaben (Geokoordinaten) unterschiedlicher Koordinatensysteme miteinander zu verbinden. Da von den verschiedenen Herstellern landwirtschaftlicher Geräte unterschiedliche Standards für die Datenverarbeitung auf Jobrechnern und Bordcomputern entwickelt worden sind, müssen Geografische Informationssysteme zusätzlich diese Standards unterstützen. Das GIS sollte also in der Lage sein, verschiedene Datenformate zu lesen und die unterschiedlichen Inhalte der vom Bordcomputer oder anderen

mobilen Rechnern erstellten Datensätze sachgerecht zu verarbeiten. Die Datenerfassung liefert in der Regel Punktdatensätze. Dies gilt für die relativ geringe Anzahl von Daten aus Bodenproben ebenso wie für Ertragsdaten und andere Daten mit höherer Erfassungshäufigkeit. GIS ermöglichen die Überführung von Punktdatensätzen in Flächendatensätze. Die grundlegenden Arbeitsschritte sind dabei Rasterbildung, Interpolation und Bildung von Werteklassen.

Bei der Rasterbildung wird ein Gitter, bestehend aus vielen gleichförmigen Gitterzellen, über die betrachtete Fläche gespannt. Die äußeren Grenzen des Rasters werden über die Geokoordinaten der Feldgrenzen bestimmt. Um verschiedene Rasterdatensätze eines Feldes zusammen darstellen zu können, ist es notwendig, dass die Datensätze die gleiche Größe der Rasterzellen und den gleichen Ausgangspunkt der Rasterbildung haben. Bei der Bestimmung der Rasterzellengröße ist es sinnvoll, die Arbeitsbreite der verwendeten Geräte zu berücksichtigen. Wenn möglich sollte die Rastergröße auch an der Variabilität der Merkmalsausprägungen ausgerichtet werden. Mit steigender Rastergröße sinkt die Korrelation zwischen den gemessenen Werten und den berechneten (interpolierten) Werten einer Fläche (Ludowicy et al. 2002, S. 86 f.).

Mittels geostatistischer Interpolationsverfahren wird aus den punktuell gemessenen Daten die flächenhafte Verteilung der entsprechenden Merkmale auf den Rasterzellen berechnet. Rasterbildung und Interpolation werden bei vielen GIS mit voreingestellten Werten weitgehend automatisch durchgeführt. Vom Benutzer werden lediglich die Rasterzellengröße und die Interpolationsmethode festgelegt. Es gibt verschiedene Verfahren zur räumlichen Interpolation, die in den jeweiligen GIS in entsprechenden Interpolationsalgorithmen umgesetzt worden sind. Alle Verfahren beruhen auf der Annahme, dass es Ähnlichkeiten zwischen räumlich benachbarten Merkmalsausprägungen (Werten) gibt. Dementsprechend werden aus den Ausgangsdaten Werte für die benachbarten Rasterzellen berechnet (Ludowicy et al. 2002, S. 86 u. 89). Das Programm TopoL kann z. B. dazu verwendet werden, auf Grundlage manueller Unkrautbonituren an den Schnittpunkten eines imaginären über das Feld gelegten Gitternetzes durch Interpolation eine Karte der Unkrautverteilung für das gesamte Feld zu erstellen.

Schließlich wird für die Erstellung einer Kartendarstellung eine Unterteilung in Werteklassen vorgenommen. Bei den meisten GIS ist eine Anzahl von fünf Werteklassen voreingestellt, wobei bei modernen GIS die Anzahl der Werteklassen für ein Merkmal verändert werden kann. Die Anzahl der Klassen sollte allgemein der Variabilität der Werte und ihrer Aussagekraft angepasst sein. So nutzt es nichts, wenn bei der Ertrags- oder Nährstoffkartierung sehr viele Klassen dargestellt werden, wenn daraus keine unterschiedlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen abgeleitet werden können (Ludowicy et al. 2002, S. 93). Ergebnis dieser Schritte der Datenverwaltung und -analyse sind Kartendarstellungen für die verschiedenen Merkmale, also Boden-, Nährstoffversorgungs- und Ertragskarten.

Auf der Grundlage dieser Karten ist dann eine Interpretation der Daten vorzunehmen, um teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen bzw. Applikationskarten abzuleiten. Da Bestandsentwicklung und Ertragsbildung von einer großen Anzahl verschiedener Faktoren beeinflusst werden, ist dies keine einfache Aufgabe. So kann die Ertragskarte eines Jahres nicht ohne weiteres genutzt werden, um für die Folgefrucht Zonen mit hohen, mittleren und niedrigen Ertragspotenzialen und damit entsprechende Intensitätsstufen der Bewirtschaftung abzuleiten. In der Regel sind komplexere Lösungen notwendig, die verschiedene Datensätze (z. B. Nährstoffversorgungs- und Ertragskarten), Standortkenntnisse und Erfahrungswissen sowie Beratungs- und Entscheidungsunterstützungssysteme (s. u.) nutzen. Prinzipiell soll die Ausprägung der Bewirtschaftungsmaßnahme (Applikationsmengen, Sollwerte) berechnet und in Applikationskarten (Sollwertkarten) dargestellt werden. Die Möglichkeit zur Erstellung von Applikationskarten ist bisher allerdings nur bei wenigen Geografischen Informationssystemen gegeben.

Die angebotenen GIS-Programme unterscheiden sich durch die Anzahl der implementierten Funktionen, ihre Benutzerfreundlichkeit und ihre Integrationsfähigkeit ins Gesamtkonzept eines Betriebes. Während einige speziell auf die Bedürfnisse der pflanzenbaulichen Produktion eingehen, orientieren sich andere stärker an der Integration von GIS-Funktionen in vorhandene Schlagkarteien. Die Stärken der ersten Gruppe liegen in ihren umfangreichen Möglichkeiten beim Datenimport und beim Zusammenführen verschiedener Feldinformationen sowie ihren Optionen zur Ansteuerung der Applikationstechnik. Die Vorteile der zweiten Gruppe bestehen in der Integration von GIS-Funktionen bzw. Modulen zur Geodatenverarbeitung in bestehende (oder neu entwickelte) Schlagkarteien bzw. Controllingprogramme (Ludowicy et al. 2002, S. 82 f.).

Beratungs- und Entscheidungsunterstützungssysteme

Von zentraler Bedeutung für die Umsetzung einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung ist der Umstand, dass das Vorliegen der Daten zu bestimmten Standort- und Bestandsparametern allein dem Landwirt nicht die Entscheidung für die am besten geeignete Maßnahme abnimmt. Vielmehr ist er gerade vor dem Hintergrund großer Mengen von Daten zu „isolierten“ Parametern darauf angewiesen, durch geeignete Computerprogramme in seinen Entscheidungen unterstützt zu werden. Die computergestützten Systeme zur Beratung und Entscheidungsfindung müssen transparent und modifizierbar sein, um zu gewährleisten, dass die Entscheidungsempfehlung für den Landwirt nachvollziehbar ist (Ehlert et al. 2004, S. 72) und das System von den Landwirten akzeptiert wird.

Die Erstellung von Sollwert- und Applikationskarten ist bislang mit Problemen verbunden, da eine hinreichend gute Abbildung der komplexen Wechselwirkungen pflanzenbaulicher und natürlicher Prozesse in einem Modell schwierig ist und die für die Modelle benötigten Daten

nicht in jedem Fall in der erforderlichen Qualität zur Verfügung stehen. Die Schwierigkeiten, die bei der Bestimmung von Sollwerten auftreten, sollen am Beispiel der Definition der kleinsten Bewirtschaftungseinheit verdeutlicht werden, die eine wesentliche Voraussetzung für die Durchführung teilflächenspezifischer Maßnahmen darstellt. Anhand der unterschiedlichen Ausprägung bestimmter Merkmale (d. h. aufgrund ihrer Heterogenität) müssen Teilflächen abgegrenzt und als kleinste Bewirtschaftungseinheit definiert werden. Allerdings gibt es zum gegenwärtigen Entwicklungsstand keine übereinstimmenden, durch Pflanzenbauer, Pflanzenernährer, Bodenkundler und Agrartechniker definierten und gewichteten Parameter zur Beschreibung der Heterogenität (Variabilität) innerhalb einzelner Felder (Ehlert et al. 2004, S. 88). Vereinfachend wird in der Praxis daher angenommen, dass die Heterogenität eines Feldes anhand von Merkmalen beschreibbar ist, die vorrangig den Bodeneigenschaften als Ursache und der gebildeten Pflanzenmasse als resultierende Wirkung zugeordnet werden können.

Weltweit existiert eine Vielzahl computergestützter Pflanzenwachstumsmodelle und Beratungssysteme. Sie geben Empfehlungen bei acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen zur Sicherung von Qualität und Quantität des Ertrags. In Deutschland wird z. B. seit 2001 das „Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion“ (ISIP) von den Landwirtschaftskammern und Landesämtern über das Internet angeboten (http://www.isip.de). Es bietet v. a. aktuelle Informationen zum Pflanzenschutz. Das Pflanzenschutzberatungssystem „proPlant expert.classic“ berechnet auf Grundlage von Wetterdaten die Infektionswahrscheinlichkeiten für alle wichtigen Pilzkrankheiten. Bei der Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben sind Entscheidungshilfen wie der „Landwirtschaftliche Informationsdienst Zuckerrübe“ (http://www.liz-online.de) oder die „Beratung und Information für den Süddeutschen Zuckerrübenanbau“ (http://www.bisz.suedzucker.de) über dass Internet verfügbar. Modelle, die Empfehlungen zur Stickstoffdüngung geben, sind z. B. das dynamische Bodenstickstoffmodell HERMES und das Computerprogramm Expert-N zur Düngungsberatung (http://www.gsf.de/iboe/expertn/). Die Modelle berechnen mittels verschiedener Parameter (z. B. Boden- und Wetterdaten) eine flächenspezifische Düngeempfehlung. Mit dem Programm „Local Resource Information System“ (LORIS®) können ebenfalls differenzierte Applikationskarten für PA erzeugt werden (Lettner et al. 2001, S. 121).

Bislang orientieren sich die Managementregeln der Beratungssysteme vorrangig an der flächeneinheitlichen Bewirtschaftung. Mittlerweile werden jedoch von einigen Herstellern im Zusammenhang mit ihren Produkten teilflächenspezifische Managementregeln ausgegeben. Hierzu zählt beispielsweise die Software KEMIRA LORIS®, die nach Herstellerangaben „mit Ertragskartierungssystemen und GPS-gesteuerter Ausbringungstechnik aller führenden Hersteller kompatibel“ ist (http://www.kemiraloris.de).

Datenmanagement in Onlineverfahren

Beim Einsatz von reinen Onlineverfahren ist der Aufwand für das Datenmanagement geringer. Dennoch ist die Sensorik allein nicht ausreichend. Von den sensorisch erfassten Daten über den Standort und den Pflanzenbestand muss auch hier auf die Art und Ausprägung der Bewirtschaftungsmaßnahme geschlossen werden, was die Existenz von Modellen und deren Umsetzung in Form von Algorithmen voraussetzt.

Die Georeferenzierung und Speicherung der Daten ist hier prinzipiell nicht notwendig. Zur Dokumentation und zur Verknüpfung mit anderen Datensätzen kann aber die georeferenzierte Speicherung der Sensordaten und der Bewirtschaftungsdaten – z. B. durch Einspeisung in ein GIS – durchaus sinnvoll sein. Voraussichtlich werden außerdem Sensoransätze mit Kartenüberlagerung zukünftig an Bedeutung gewinnen.

Hardware

Die erforderliche Hardware besteht im Wesentlichen aus einem Betriebsrechner, dem Bordcomputer sowie Jobrechnern auf den Geräten. Wesentliche Aufgaben des Bordcomputers sind, Informationen über den Zustand der Maschinen anzuzeigen, Warnungen über Fehlabläufe zu geben und die Übertragung von Daten an externe Geräte, wie z. B. den Betriebsrechner, zu ermöglichen. Zudem gibt der Bordcomputer dem Anwender die Möglichkeit, in den ansonsten weitgehend automatisierten Verfahrensablauf zwischen verschiedenen Sensoren und Aktoren einzugreifen (Mensch-Maschine-Schnittstelle). Der Jobrechner ist ständig mit dem Bordcomputer verbunden und verteilt dessen Signale an die unterschiedlichen Bauteile des jeweiligen Anbaugeräts. Der Betriebsrechner mit geeigneter Software (z. B. ein GIS) dient der Verwaltung der Daten sowie der Erstellung der Sollwertkarten.

6. Applikations- und Navigationstechnik

Zur Umsetzung der gewonnenen Informationen (Kap. II.3) ist eine entsprechende Applikationstechnik notwendig. Die Umsetzung von Sollwertkarten in eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung setzt in Offlineverfahren voraus, dass die Landmaschine über ein Ortungssystem verfügt, das eine Bestimmung ihrer Position und damit die Zuordnung der Vorgaben in der Karte auf die reale Position auf dem Acker ermöglicht. Ein solches satellitengestütztes Positionierungssystem (Kap. II.4) ist somit nicht nur für die teilflächenspezifische Kartierung von Boden- und Pflanzenparametern, sondern auch für die Durchführung der Maßnahmen erforderlich.

Der Datenaustausch zwischen Sensoren, Bordcomputer und Jobrechner der Applikationsgeräte findet im „mobilen Prozesscomputersystem“ (MPS) statt. Die Übertragung von Maschinenaufträgen zur eigentlichen Applikationstechnik geschieht also über verschiedene IT-Bauteile auf der Landmaschine. Die herstellerübergreifende Kommunikation zwischen verschiedenen elektronischen Komponenten erfolgt mittels eines „binary unit system“ (BUS). Das landwirtschaftliche BUS (LBS) wurde 1997

auf nationaler Ebene standardisiert (DIN 9684). Inzwischen ist dieser Ansatz durch die internationale Norm ISO 11783 erweitert worden und bildet somit die Grundlage für das zukünftige Informations- und Datenmanagement auf Landmaschinen und ihrer betrieblichen Umgebung.

Eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung erfordert weiterhin, dass die Geräte zur Durchführung entsprechender Bewirtschaftungsmaßnahmen eine gezielte Veränderung der Ausprägung der Maßnahme erlauben. So muss beispielsweise für eine nach Teilflächen differenzierte Ausbringung von Düngemitteln die Applikationstechnik ermöglichen, die ausgebrachte Menge nach Vorgabe des Maschinenauftrags (bzw. bei Onlineverfahren der unmittelbar zuvor erstellten Anweisung) zu variieren. Dabei kann – je nach Anwendung – eine Veränderung der Ausprägung in unterschiedlicher Form nötig sein, z. B. die Variation der Intensität einer Bodenbearbeitungsmaßnahme oder das Aussetzen der Pflanzenschutzmittelapplikation auf bestimmten Teilflächen. Eine gezielte Ansteuerbarkeit ist somit Voraussetzung für alle Applikationstechniken.

Ortungssysteme auf der Landmaschine können darüber hinaus auch in der Fahrzeugnavigation eingesetzt werden (Kap. III.6). Sie ermöglichen hier eine verbesserte Führung der Landmaschinen, indem dem Landwirt angezeigt wird, ob er sich in der optimalen Fahrspur befindet. Dadurch soll erreicht werden, dass die pflanzenbauliche Maßnahme – etwa bei der Bodenbearbeitung – ohne Überlappungen durchgeführt wird. Nicht zuletzt hat dies aber auch eine erhebliche Entlastung des Fahrers zur Folge.

7. Fazit

Die teilflächenspezifische Bewirtschaftung gilt als Kernbereich von PA und wird deshalb in diesem Bericht vereinfachend mit PA als informationsgeleitetes Managementsystem der pflanzlichen Produktion gleichgesetzt. Mit PA können innerhalb einer Ackerfläche vorhandene, kleinräumig variierende Bodenverhältnisse und Pflanzenbestände erfasst und die pflanzenbaulichen Maßnahmen anhand dieser Informationen sowie mit speziellen Systemen der Informationsauswertung und geeigneter Gerätetechnik räumlich, zeitlich und mengenmäßig präziser als bisher gestaltet werden.

Die grundsätzlichen Arbeits- bzw. Verfahrensschritte bei PA-Awendungen, die insbesondere auf satellitengestützten Ortungs- und sensorbasierten Erfassungssystemen basieren, sind die Datenerfassung, die Entscheidungsfindung und die Ergebnisanwendung in der Applikationstechnik. In Abhängigkeit von der zeitlichen Beziehung zwischen Datenerfassung und Bewirtschaftungsmaßnahme kann bei PA-Verfahren grundsätzlich zwischen Offlineverfahren (auch als Kartieransatz bezeichnet) und Onlineverfahren (auch Sensor- oder Echtzeitansatz genannt) unterschieden werden. Diese beiden Ansätze lassen sich auch als Sensoransatz mit Kartenüberlagerung kombinieren.

Bei Offlineverfahren besteht zwischen Datenerfassung, Erstellung des Maschinenauftrags und Durchführung der Bewirtschaftungsmaßnahme kein unmittelbarer zeitlicher Zusammenhang. Offlineverfahren sind deshalb v. a. für Anwendungen, die sich auf langsam verändernde Merkmale (z. B. Phosphatgehalt im Boden) beziehen, geeignet. Für die Datenerfassung steht hier eine Vielzahl von Datenquellen zur Verfügung. Die Zusammenstellung und Verwaltung verschiedener Standort- und Pflanzendaten sowie ihre Umsetzung in Karten, beispielsweise mittels Geografischer Informationssysteme (GIS), ist vielfach erprobt und prinzipiell praxisreif. Die Datenerhebung und -analyse kann vom landwirtschaftlichen Betrieb selbst durchgeführt oder einem Dienstleister übertragen werden.

Ein wesentliches Merkmal von Offlineverfahren ist die Berücksichtigung von Informationen über die geografische Lage sowohl bei der Datenerfassung als auch für die Steuerung von Bewirtschaftungsmaßnahmen. In der Praxis werden verschiedene satellitengestützte Navigationssysteme verwendet, z. B. das Globale Positionierungssystem (GPS). Mit dem europäischen Navigations- und Ortungssystem GALILEO wird ab 2010 ein rein ziviles und noch präziseres Ortungssystem zur Verfügung stehen.

Die Schwachstellen von Offlineverfahren liegen bei dem notwendigen Arbeitsaufwand (z. B. bei manuellen Bonituren) oder den Kosten (z. B. bei Bodenbeprobungen und Bodenanalysen) zur Datenerhebung und bei der aufwendigen Verwaltung großer Datenmengen sowie bei der Umsetzung der erfassten Daten in teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen. Die zu erstellenden Sollwert- bzw. Applikationskarten müssen zutreffend, hinreichend genau und kostengünstig produzierbar sein, damit Offlineverfahren eine breite Anwendung finden können. Aufgrund der großen Datensätze zu verschiedenen Merkmalen, der komplexen Wechselwirkungen zwischen diesen und der begrenzten Verfügbarkeit von Entscheidungsunterstützungssystem ist dies keine leichte Aufgabe.

Bei Onlineverfahren liefern Sensoren die Information für die unmittelbar anschließende Bewirtschaftungsmaßnahme, d. h. die relevanten Merkmale (etwa der Stickstoffbedarf des Pflanzenbestands) werden anhand von optischen, mechanischen oder biochemischen Eigenschaften des Standorts oder Pflanzenbestands indirekt auf dem Feld erfasst und die entsprechenden Maßnahmen (z. B. die Applikation eines Stickstoffdüngers) unmittelbar daran gekoppelt ausgeführt. Dieser Ansatz ist besonders geeignet für Maßnahmen, die auf sich zeitlich schnell verändernde Boden- und Pflanzeneigenschaften (z. B. Stickstoffversorgung oder Grad der Verunkrautung) reagieren. Erste praxisreife Anwendungen von Onlineverfahren existieren für die Stickstoffdüngung und die Unkrautbekämpfung. Die ausreichend genaue und kostengünstige Datenerfassung mittels Sensoren ist für viele Anwendungsbereiche noch im Stadium der Forschung und Entwicklung, so dass dies derzeit eine bedeutende Schwachstelle von Onlineverfahren darstellt. Bei der Entwicklung von sensorbasierten Datenerfassungssystemen

sind insbesondere folgende Schwierigkeiten zu überwinden:

– Störgrößen (z. B. Belichtungsverhältnisse) sind auszuschalten sowie eine umfangreiche Eichung und Kalibrierung (z. B. Anpassung an verschiedene Sorten) ist unter Feldbedingungen durchzuführen.

– Viele mit Sensoren erfassbare Pflanzenparameter werden durch verschiedene maßnahmenunabhängige Faktoren beeinflusst (z. B. verändern neben Pilzbefall auch Nährstoffmangel und Trockenstress die Chlorophyllfluoreszenz), so dass von den Sensordaten nicht unmittelbar auf die Ausgestaltung der Bewirtschaftungsmaßnahme geschlossen werden kann.

Eine weitere Schwachstelle von Onlineverfahren sind – wie bei den Offlineverfahren auch – die fehlenden pflanzenbaulichen Regeln zur Interpretation der erfassten Sensordaten und zur Ableitung gesicherter Entscheidungsalgorithmen für die (semi)automatische Umsetzung von Sensorinformationen in Applikationsmaßnahmen. Schließlich ist noch darauf hinzuweisen, dass die Nachvollziehbarkeit der Algorithmen zur Steuerung der Applikationstechnik für die Akzeptanz bei den Landwirten von Bedeutung ist. Es wird erwartet, dass zukünftig Kombinationen von Offline- und Onlineverfahren – also Sensoransätze mit Kartenüberlagerung – an Bedeutung gewinnen werden. Damit werden allerdings auch die Anforderungen an Datenverwaltung, Dateninterpretation und Entscheidungsfindung weiter steigen.

Die Entwicklung der Applikationstechnik für teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen ist weit vorangeschritten. Für viele der relevanten Anwendungsbereiche sind entsprechende Geräte bzw. Landmaschinen verfügbar. Bordcomputer und Jobrechner werden serienmäßig angeboten und mit dem landwirtschaftlichen BUS (ISOBUS-System) ist ein international normierter und herstellerübergreifender Datenaustausch zwischen den verschiedenen elektronischen Komponenten sichergestellt.

III. Anwendungsfelder von Precision Agriculture

Im Folgenden[2] wird ein Überblick über die Anwendungsfelder von PA von der Bodenbearbeitung über die Aussaat, die Grund- und Stickstoffdüngung, die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln und Wachstumsregulatoren, die Erfassung der Erntemenge und der Qualität des Ernteguts bis hin zur automatischen Spurführung des Traktors gegeben. Dabei werden sowohl solche Verfahren behandelt, die sich noch im Stadium der Forschung und Entwicklung befinden, als auch Anwendungen, die bis zur Praxisreife entwickelt wurden oder bereits eine gewisse Verbreitung in der Praxis gefunden haben. Anschließend wird der Nutzen von PA für die Dokumentation der landwirtschaftlichen Produktion diskutiert sowie der Stand der nationalen, europäischen und außereuropäischen Forschung im Bereich PA dargestellt.

1. Bodenbearbeitung

Die Bodenbearbeitung dient dazu, Ernterückstände in den Boden einzuarbeiten, die in der organischen Bodensubstanz enthaltenen Nährstoffe zu mobilisieren, die Unkrautentwicklung zu unterdrücken und die Bodenstruktur zu verbessern. Die Bearbeitung des Bodens kann teilflächenspezifisch erfolgen, indem innerhalb eines Feldes die Arbeitstiefe oder die Bearbeitungsintensität variiert werden. Da die Arbeit mit dem Pflug oder dem Grubber mit einem verhältnismäßig hohen Kraftstoffbedarf einhergeht, wird von ihrer teilflächenspezifischen Durchführung insbesondere eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs erwartet. Darüber hinaus könnte eine an die lokalen Gegebenheiten angepasste Bodenbearbeitung auch dem Erreichen bestimmter Umweltziele (z. B. Erosionsschutz) dienen sowie den Ertrag erhöhen, indem die für die Pflanzenproduktion relevanten Eigenschaften des Bodens optimal eingestellt werden.

Variation der Arbeitstiefe

Bei der derzeit üblichen flächeneinheitlichen Bodenbearbeitung geht in die Bemessung der Arbeitstiefe eine Reihe von Bodenparametern ein, deren mittlere Ausprägung der Landwirt schätzt. Dazu zählen v. a. die Bodenart und -feuchte, der Verdichtungszustand, die Menge der in den Boden einzuarbeitenden Ernterückstände, die Ansprüche der betreffenden Kulturpflanzen sowie vorhandene Unebenheiten (z. B. Spurtiefen). Eine kontinuierliche Messung der genannten Parameter als Grundlage für eine Bewirtschaftung nach dem Onlineansatz ist gegenwärtig nicht realisierbar. Erprobt wird deshalb eine teilflächenspezifische Anpassung der Arbeitstiefe nach dem Offlineansatz, bei dem verschiedene der o. g. Parameter zur Bemessung der Arbeitstiefe verwendet werden. Eine tiefe Bodenbearbeitung (20 bis 25 cm) wird als notwendig erachtet in allen Bereichen, in denen das Bodengefüge von Dichtlagerung gefährdet ist, wenn Vernässungsmerkmale vorhanden sind, wenn der Humusgehalt zu gering ist sowie zusätzlich in Kuppen- und Senkenbereichen[3]. In den anderen Fällen wird eine flache Bodenbearbeitung (rund 10 cm) als ausreichend angesehen. Die erforderlichen Daten können den Karten der Bodenschätzung, Messungen der elektrischen Leitfähigkeit, Bohrstockproben oder einem digitalen Geländemodell entnommen werden. Im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts preagro wurde in einer Kooperation zwischen der Firma Amazonenwerke und der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Völkenrode (FAL) ein Aggregat mit getriebenen bzw. gezogenen Saatbettbereitungswerkzeugen entwickelt, dessen Arbeitstiefe sich gemäß einer Applika-

[2] Das Kapitel basiert in weiten Teilen auf dem Gutachten von Ehlert et al. (2004).

[3] Der Lockerungsbedarf in den Senken wird aufgrund häufig auftretender hydromorpher Erscheinungen angenommen; an den Kuppen wird mit schlechter Bodenstruktur durch geringen Humusgehalt gerechnet.

tionsdatei steuern lässt. In der Praxis spielt dieses Verfahren bislang jedoch keine Rolle.

Ein anderer Ansatz zur Steuerung der Arbeitstiefe von Lockerungswerkzeugen besteht darin, den spezifischen Bodenwiderstand zur Schätzung der Bodendichte tiefenabhängig zu messen. Seit langem bekannt ist das Handpenetrometer, ein Gerät, das die zum Eindrücken einer Kegelspitze in den Boden erforderliche Kraft sowie die zugehörige Tiefe misst. Davon ausgehend sind neue Lösungen entstanden, bei denen an ein Fahrzeug gekoppelte Vorrichtungen hydraulisch eingedrückt werden und dabei neben Tiefe und Bodenwiderstand auch den Wassergehalt des Bodens messen, da dieser die Höhe des Bodenwiderstands mit beeinflusst. Außerdem ist es möglich, die Zugkraft an einzelnen Bodenbearbeitungswerkzeugen (z. B. Pflugkörper) oder ihnen nachgebildeten Sensoren zu bestimmen. Dies kann beim gegenwärtigen Stand der Technik relativ einfach bei der Ausführung eines Arbeitsganges gleichzeitig mit einer satellitengestützten Positionierung geschehen. In einem neueren Ansatz wird das Geräusch gemessen, das bei der Bewegung eines keilförmigen Elements durch den Boden entsteht; es verändert sich in Abhängigkeit von der Bodendichte. Auch in Verbindung mit den hier genannten Ansätzen besitzt die teilflächenspezifische Anpassung der Bearbeitungstiefe bisher keine Praxisrelevanz.

Variation der Bearbeitungsintensität

Die Gefügestabilität (Zerfallsbereitschaft) des Bodens kann innerhalb eines Feldes erheblich variieren. Bei der Saatbettbereitung ist es jedoch erwünscht, ein möglichst homogenes Saatbett mit kleinen Bodenaggregaten für einen schnellen und gleichmäßigen Feldaufgang des Saatguts zu schaffen. Dies könnte durch eine kleinräumige Anpassung der Intensität der Bodenbearbeitung erreicht werden, etwa durch variieren der Stoßgeschwindigkeit des Werkzeugs. Hierfür sind in erster Linie getriebene Werkzeuge (z. B. Kreiseleggen) geeignet.

Die Zerfallsbereitschaft des Bodens ist u. a. abhängig von der Bodenart und dem Wassergehalt. Keiner dieser Parameter kann derzeit sensortechnisch erfasst werden, und lediglich die Bodenart lässt sich im Vorfeld der Bearbeitung auf Grundlage von Kartenmaterial ermitteln. Daher wird für die Variation der Bearbeitungsintensität ein Onlineansatz diskutiert, dem als Regelgröße nicht der Bodenzustand vor dem Durchgang der Maschine dient, sondern das Ergebnis der Bearbeitungsmaßnahme in Form der erreichten Zerkleinerung des Bodens hinter der Maschine, gemessen anhand des Kraftverlaufs eines gezogenen Zinkens oder durch Bildanalyse. Entsprechende Ansätze sind bisher jedoch über das Versuchsstadium nicht herausgekommen. Insgesamt sind die Möglichkeiten, auf die örtlich unterschiedlichen Bodenverhältnisse zu reagieren, noch begrenzt. Neben der Ermittlung des Istzustands des Bodens bereitet auch die Bestimmung der Sollvorgaben mit Hilfe geeigneter Modelle noch Schwierigkeiten. Auch die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen einer variablen Bearbeitungsintensität des Bodens sind noch weitestgehend ungeklärt.

2. Aussaat

Bei der Aussaat ist der Landwirt daran interessiert, eine für die Standortgegebenheiten optimale Bestandsdichte an Kulturpflanzen zu etablieren. Dabei muss er zum einen die Ablagetiefe des Saatguts je nach Kulturpflanzenart den Bodenverhältnissen anpassen, um einen möglichst vollständigen Aufgang zu erhalten; zum anderen orientiert er sich bei der Saatstärke (d. h. der Anzahl der Samenkörner pro Ackerfläche) an der Ertragskapazität des Bodens. Sind die relevanten Bodenparameter innerhalb eines Feldes stark heterogen, so können mit Hilfe einer teilflächenspezifischen Aussaat sowohl die Ablagetiefe als auch die Saatstärke an die lokalen Gegebenheiten angepasst werden.

Variation der Ablagetiefe

Die optimale Ablagetiefe für das Saatgut von Kulturpflanzen ist von Art zu Art unterschiedlich. Sie hängt außerdem von den Bodenverhältnissen, d. h. insbesondere der Bodenfeuchte und der Bodenart ab. Bei sehr heterogenen Böden ist es für den Landwirt schwierig, eine geeignete Ablagetiefe zu bestimmen bzw. bei einheitlicher Saattiefe ist dann nicht auf allen Teilflächen mit einem optimalen Feldaufgang des Saatguts zu rechnen. Steuerungskonzepte, die auf Grundlage der relevanten Bodenparameter die Ablagetiefe bestimmen sollten, erwiesen sich für die Praxis als zu kompliziert und störanfällig. Eine Ausnahme bilden Fälle, in denen eine stark variierende Bodenfeuchte den entscheidenden Faktor darstellt: Dann sollte auf Teilflächen hoher Feuchte die Saattiefe vermindert werden. In Gebieten mit lange ausbleibenden Niederschlägen hingegen kann eine Erhöhung der Saattiefe empfehlenswert sein, was allerdings für die klimatischen Bedingungen Deutschlands nur in bestimmten Trockenlagen relevant ist. Insgesamt scheint der Nutzen einer Saattiefenregelung – am Aufwand gemessen – gering zu sein, so dass diese Richtung gegenwärtig nicht verfolgt wird.

Variation der Saatstärke

Die Erzielung hoher Erträge erfordert eine standortabhängige, optimale Anzahl an Pflanzen bzw. Halmen pro Quadratmeter. Die Pflanzenzahl entspricht der Anzahl der Saatkörner verringert um die Verluste durch unvollständigen Feldaufgang, Tierfraß und Ausfälle während der Vegetationsperiode. Einige Getreidearten besitzen die Fähigkeit, durch Bestockung oder Rückbildung von Halmen eine optimale Halmdichte trotz ungünstiger Pflanzenzahl zu erreichen. Dies trifft insbesondere auf Roggen zu. Weizen hingegen besitzt die Fähigkeit zur Bestockung nur bedingt, Mais generell nicht. Je geringer die Bestockungsfähigkeit, desto größer ist die Bedeutung einer standortangepassten Saatstärke. Um die optimale Saat-

stärke für die teilflächenspezifische Aussaat zu ermitteln, wird vorgeschlagen, die Ertragserwartung für das Anbaujahr zugrunde zu legen. Diese abzuschätzen ist jedoch schwierig, ebenso wie die Abgrenzung von Ertragspotenzialzonen innerhalb eines Feldes. Ansätze bestehen darin, die in den Karten der Bodenschätzung ausgewiesenen Ackerzahlen oder die Ertragsverteilung in den vorangegangenen Jahren als Grundlage für die Erstellung von Ertragspotenzialkarten zu verwenden. Bei Getreide kann dabei auf die Ertragskartierung mit Mähdreschern zurückgegriffen werden, die mittlerweile Stand der Technik ist. Auch die Nutzung indirekter Messverfahren ist möglich. Dennoch bleibt die Prognose künftiger Erträge stark fehlerbehaftet, da sie verschiedenen, teilweise nicht abschätzbaren Einflüssen (z. B. Witterungsverlauf) unterliegt.

Sämaschinen, die eine teilflächenspezifische Anpassung der Saatstärke ermöglichen, sind bereits auf dem Markt verfügbar. Dazu zählen z. B. pneumatische Drillmaschinen, die die Menge des dem Luftstrom zugeführten Saatguts stufenlos regeln können. Eine neuere Entwicklung stellen Geräte dar, die Samenkörner vor der Ablage in den Boden zählen, so dass Aussaatempfehlungen sehr genau eingehalten werden können (z. B. von der Firma Amazonenwerke). Der Effekt variabler Aussaatstärken bei Getreide ist infolge der unzureichenden Vorhersage der zu erwartenden Ertragszonen sowie der Bestockungsdynamik des Getreides eher gering. So ist nach derzeitigem Kenntnisstand nur auf ausgewählten Feldern, insbesondere bei hoher Ortstreue des Ertragsmusters über einen längeren Zeitraum, mit einem Nutzen der Maßnahme zu rechnen. Für die teilflächenspezifische Aussaat von Mais konnten dagegen z. T. positive Wirkungen (z. B. Mehrertrag) nachgewiesen werden.

3. Düngung

Der Gehalt an Bodennährstoffen ist für ein gutes Wachstum der Kulturpflanzen essenziell. Dabei sind insbesondere die Nährstoffe Stickstoff, Phosphat, Kalium und Magnesium sowie darüber hinaus der Kalkgehalt von Bedeutung. Die Nährstoffe unterliegen im Boden einer spezifischen Dynamik: Sie werden beim Wachstum der Pflanze dem Boden entzogen, in die Biomasse eingebaut und mit der Ernte vom Acker entfernt. Je nach Nährstoff kann auch ein Austrag über das Sickerwasser oder die Bodenerosion stattfinden. Beim Stickstoff kommt hinzu, dass er im Zuge vielfältiger Umwandlungsprozesse in verschiedene, teilweise gasförmige Verbindungen überführt werden kann, die dann – etwa als Lachgas oder Ammoniak – dem System verloren gehen. Aufgrund der genannten Prozesse sowie in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Humusgehalt können die Bodennährstoffgehalte auf heterogenen Flächen mitunter stark variieren. Der Zweck der Düngung besteht darin, durch die Zufuhr geeigneter Mengen der verschiedenen Nährstoffe eine optimale Versorgung der Pflanzen zu gewährleisten. Durch eine teilflächenspezifische Variation der Düngung sollen kleinräumige Unterschiede in der Nährstoffversorgung der Kulturpflanzen und im Nährstoffgehalt des Bodens berücksichtigt bzw. ausgeglichen werden. Hierdurch werden zum einen Einsparungen beim Betriebsmitteleinsatz (mit der damit verbundenen Reduktion von Kosten und Umweltbelastungen) und zum anderen eine Erhöhung des Ertrags erwartet.

Variation der Grunddüngung und Kalkung

Über die Grunddüngung wird der Boden mit den Makronährstoffen Phosphat, Kalium und Magnesium versorgt; die Kalkung dient in erster Linie dazu, einen bestimmten Boden-pH-Wert einzustellen, der für die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe als optimal gilt. Das angestrebte Nährstoffniveau richtet sich dabei zum einen nach dem geschätzten Ertrag der betreffenden Kulturart, zum anderen nach dem Nährstoffvorrat im Boden. Unter bestimmten Umständen kann eine Korrektur der daran orientierten Düngermenge nötig sein, etwa um auf bestimmten Teilflächen (z. B. im Randbereich von Gewässern) Umweltziele einzuhalten.

Für eine teilflächenspezifische Grunddüngung muss sowohl die Ertragsschätzung als auch die Bestimmung des Nährstoffvorrats im Boden teilflächenspezifisch erfolgen. Der Nährstoffgehalt wird anhand von Mischproben aus dem Krumenbereich des Bodens und deren Analyse im Labor bestimmt. Die Rastergröße für die Beprobung bei flächeneinheitlicher Düngung wird von den Ländern vorgegeben. Landwirte, die teilflächenspezifisch düngen wollen, entscheiden sich häufig für ein feineres Raster mit Rasterflächen von 1 ha Größe. Wegen der hohen Kosten einer solchen Bodenbeprobung wird vorgeschlagen, gezielt bestimmte Zonen zu beproben, die als relativ homogen angenommen werden. Solche Zonen sollen aus Bodenkarten, Ertragskarten, dem Geländemodell, Messungen der elektrischen Bodenleitfähigkeit o. ä. abgeleitet werden. Mehrere Untersuchungen zeigen jedoch, dass die unterstellten Beziehungen zwischen den Nährstoffgehalten und Merkmalen dieser Zonen zwar auf einigen Feldern existierten, aber nicht verallgemeinerungsfähig sind (Ehlert et al. 2004, S. 38).

Daneben werden auch alternative Lösungen zur Bestimmung des Bodennährstoffgehalts entwickelt. Ein Beispiel sind multispektrale Reflexionsmessungen des Bodens vom Flugzeug aus. Hierbei wird versucht, durch die Verknüpfung der Reflexionswerte bestimmter Wellenlängen einen Wert abzuleiten, der proportional zu einem gesuchten Merkmal ist. Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass große Flächen innerhalb kurzer Zeit in hoher Auflösung erfasst und abgebildet werden können. Auf dieser Basis wäre die Entwicklung eines Sensors zur fahrzeuggestützten Bestimmung kleinräumiger Nährstoffgehalte denkbar.

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung des Bodennährstoffgehalts ist die Verwendung eines Bodenspektrophotometers. Dieses misst die Reflexion der Furchensohle eines speziellen Werkzeugs, aus der nach umfangreicher Daten-

aufbereitung Beziehungen zum Nitrat- und Kaliumgehalt sowie dem pH-Wert des Bodens abgeleitet werden können. Schließlich wird auch das Verfahren einer vereinfachten Bodenanalyse vorgeschlagen. Diese basiert auf einer automatischen, direkten Messung der Nährstoffgehalte im Boden. Kern der Technik ist eine Membran, die Ionen aus einer wässrigen Lösung der Bodenprobe trennt und so ihre Bestimmung möglich macht. Die Messgenauigkeit dieses Verfahrens ist zwar geringer als die in einem Labor erreichbare; dafür könnten innerhalb einer Minute mehrere Messungen durchgeführt werden. Am weitesten fortgeschritten ist die Entwicklung von Verfahren zur Messung des pH-Werts; Verfahren – z. B. für Kalium – befinden sich in der Entwicklung. Insgesamt jedoch gibt es zur teuren Bodenbeprobung mit anschließender Laboranalyse bislang noch kein alternatives praxisrelevantes Verfahren zur raschen und kostengünstigen Bestimmung des Bodennährstoffgehalts.

Für eine teilflächenspezifische Ausbringung von Grunddünger sind Düngerstreuer mit ansteuerbaren Vorrichtungen zur Regelung der Ausbringmenge verfügbar. Allerdings muss der Acker mehrfach überfahren werden, um den Boden mit allen Nährstoffen zu versorgen. Eine Ausnahme bildet der „TerraGator™“ (ein Selbstfahrer der Firma AGCO Corporation), der mit bis zu vier Behältern und entsprechenden Dosier- und Verteileinrichtungen für feste und flüssige Dünger aufgerüstet werden kann und mit dem sich mehrere Düngerkomponenten gleichzeitig ausbringen lassen. Der Nutzen einer teilflächenspezifischen Applikation von Grundnährstoffen wird weniger in einer möglichen Ertragssteigerung, sondern in erster Linie im Einsparpotenzial an der absolut ausgebrachten Menge an Düngermitteln gesehen (Strecker et al. 2004a, S. 18). Der Nachweis positiver Effekte wird dadurch erschwert, dass die Grunddüngung i. d. R. nicht jährlich, sondern als Vorratsdüngung in einem Intervall von mehreren Jahren durchgeführt wird.

Die bisher beschriebenen Düngeverfahren eignen sich lediglich für eine teilflächenspezifische Ausbringung von Mineraldünger. Diese besitzen einen bekannten Gehalt an pflanzenverfügbaren Nährstoffen. Da die Bodengehalte der einzelnen Nährstoffe innerhalb eines Feldes unterschiedlich sein können, müsste ihre gezielte Veränderung durch die Ausbringung von Einnährstoffdünger erfolgen, wobei für jede Düngerart eine separate Applikationsdatei erforderlich wäre. In organischen Düngern – z. B. Gülle, dem wichtigsten Dünger der viehhaltenden Landwirtschaft – hingegen sind immer mehrere Nährstoffe enthalten, deren genaue Konzentration nicht bekannt ist und die zudem variieren kann. Hinzu kommt, dass die enthaltenen Nährstoffe teilweise noch durch Umwandlungsprozesse im Boden in eine pflanzenverfügbare Form überführt werden müssen, ein Vorgang, dessen Ablauf im Vorhinein nicht hinreichend genau abgeschätzt werden kann. Deshalb ist die teilflächenspezifische Ausbringung organischer Dünger deutlich schwieriger zu bewerkstelligen als die mineralischer Dünger. Die Entwicklung von Methoden zur teilflächenspezifischen präzisen Ausbringung von Gülle steckt noch im Anfangsstadium (DBU 2006).

Variation der Stickstoffdüngung

Die Stickstoffversorgung in den verschiedenen Entwicklungsstadien der Kulturpflanzen ist für eine optimale Bestandsentwicklung von entscheidender Bedeutung. Gleichzeitig besitzt Stickstoff eine ausgeprägte Dynamik in Anhängigkeit von den jeweiligen Standort- und Witterungsverhältnissen. Aus diesen Gründen wäre eine an die lokalen Gegebenheiten angepasste Steuerung der Stickstoffzufuhr für die Landwirtschaft von großem Interesse. Gegenwärtig erfolgt die Stickstoffdüngung feldeinheitlich mit ein bis vier Gaben, wobei die Anzahl der Gaben sowie die Düngermenge durch den spezifischen Bedarf der Kulturpflanze entsprechend den Ertragserwartungen, dem Stickstoffvorrat im Boden, dem Wachstumsverlauf und der Wasserverfügbarkeit bestimmt werden.

Ein Ansatz für eine differenzierte Stickstoffdüngung mit Mineraldünger in Offlineverfahren besteht darin, anhand von Ertragskarten der vergangenen Jahre und bestimmten Bodenparametern Ertragszonen festzulegen, denen eine auszubringende Düngermenge zugeordnet ist. Die Einteilung erfolgt meist in drei Zonen (Niedrig-, Mittel- und Hochertragszone), die nach ihrem jeweils zu erwartenden Ertragspotenzial gedüngt werden. Dabei erhalten die Niedrigertragszonen geringere und die Hochertragszonen höhere Düngermengen als bei flächeneinheitlicher Nährstoffgabe. Die Düngung der Mittelertragszonen orientiert sich i. d. R. am Düngeniveau der einheitlichen Düngergaben. Allerdings führen Praxisuntersuchungen zu dieser Düngungsmethode teilweise zu widersprüchlichen Ergebnissen: So konnte bei einigen Versuchen mit differenzierter Düngung von Winterweizen ein besseres Ergebnis erzielt werden, wenn die Hochertragszonen weniger gedüngt wurden als die Niedrigertragszonen (Godwin et al. 2003). Ursache hierfür sind u. a. die großen Unsicherheiten bei der Berücksichtigung der Stickstoffdynamik im Boden sowie der Umstand, dass neben der Stickstoffversorgung auch andere Bodenparameter (etwa der Wassergehalt) für die Bestandsentwicklung ausschlaggebend sein können.

Aus diesem Grund wird in Onlineverfahren versucht, die kleinräumige Differenzierung der Stickstoffgabe auf Grundlage von Parametern durchzuführen, die in Echtzeit gewonnen werden können. Wenngleich auch hierbei von den erhobenen Daten auf die benötigte Düngermenge geschlossen werden muss, ist die Unsicherheit doch geringer, nicht zuletzt dadurch, dass keine zeitliche Verzögerung zwischen der Messung und der Düngergabe erfolgt. Als Zeiger für den Nährstoffbedarf dient hier ab der zweiten Stickstoffgabe i. d. R. die Pflanze selbst. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die verschiedenen Onlineansätze zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung.

Zur Abschätzung der Stickstoffversorgung der Kulturpflanzen werden beispielsweise optoelektronische Senso-

Tabelle 4

Onlineansätze zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung

Datengrundlage	System/Technologie
optoelektronische Daten (Grünfärbung)	Yara N-Sensor®
optoelektronische Daten (Grünfärbung, mit Lichtquelle)	GreenSeeker®
laserinduzierte Chlorophyllmessung	MiniVeg N-Lasersystem
Bodenleitfähigkeit	Soil Doctor®
Pflanzenmassedichte	CROP-Meter

Quelle: eigene Darstellung

ren verwendet, etwa der Yara N-Sensor® (früher Hydro-N-Sensor), der auf dem Fahrzeugdach montiert wird. Dieser Sensor liefert etwa 150 Messwerte/ha über die Grünfärbung der Pflanzen, mit Hilfe derer die Stickstoffgabe kulturart- und sortenspezifisch bemessen werden kann. Voraussetzung für einen störungsfreien Einsatz des Sensors sind gesunde Pflanzenbestände, die ausreichend mit den anderen Nährstoffen und Wasser versorgt sind. Wegen des passiven Messprinzips ist die Verwendung des Sensors außerdem nur bei ausreichenden Lichtverhältnissen möglich. Der Yara N-Sensor® ist seit 1998 auf dem Markt und inzwischen rund 180 Mal in Deutschland verkauft worden. Er wird in Getreide, Mais und Raps eingesetzt und auf rund 400 000 ha Ackerfläche angewandt (Anonym 2005b; Leithold 2004, S. 26 f.).

In den USA wird zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung der „GreenSeeker®" der Firma NTech Industries genutzt. Auch diese Technik basiert auf einem optischen Sensor, ist jedoch zusätzlich mit einer künstlichen Lichtquelle ausgestattet, so dass das Gerät auch bei Nacht eingesetzt werden kann. Für die Ausbringung von Flüssigdünger werden die einzelnen Sensoren auf dem Spritzbalken von Pflanzenschutzspritzen installiert und steuern direkt die Ventile zur Dosierung der Applikationsmenge. In Deutschland ist der GreenSeeker® bislang nicht erhältlich.

Mit dem „Soil Doctor® System" der Firma Crop Technology ist in den USA ein weiteres Onlineverfahren zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung im Einsatz. Dieses nutzt die Messung der elektrischen Bodenleitfähigkeit, um auf die Stickstoffversorgung und den Stickstoffbedarf der Kulturpflanzen zu schließen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist keine Tendenz zur breiteren Einführung des „Soil Doctor® Systems" in die deutsche Landwirtschaft erkennbar.

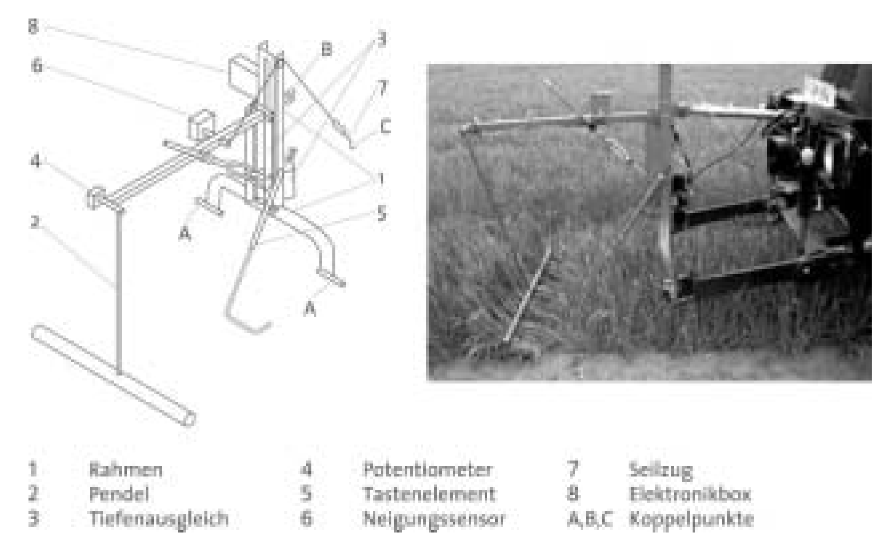
Eine Neuentwicklung stellt das „MiniVeg N-Lasersystem" der Firma Fritzmeier dar. Über eine laserinduzierte Chlorophyllmessung kann auf den Stickstoffgehalt der Pflanze geschlossen werden; zudem bestimmt das Verfahren die Höhe und Dichte des Pflanzenbestands. Das Lasersystem wird als seitwärts ausfahrbarer Ausleger am Frontkraftheber der Landmaschine montiert und steuert in Abhängigkeit von der Stickstoffversorgung den Düngerstreuer in Echtzeit. Untersuchungen über die Effekte des Systems unter Praxisbedingungen liegen bislang noch nicht vor.

Am Institut für Agrartechnik in Bornim (ATB) wurde ein mechanisches Verfahren zur Erfassung der Heterogenität von Kulturpflanzenbeständen entwickelt, das für eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung wie auch für teilflächenspezifische Pflanzenschutzmaßnahmen verwendet werden kann. Kernbestandteil des so genannten „CROP-Meters" ist ein Pendel, das als Frontzusatzgerät an Traktoren und selbstfahrende Landmaschinen angebracht wird (Abb. 5). Beim Durchfahren des Pflanzenbestands wird das Pendel ausgelenkt, wobei die Auslenkung im Wesentlichen durch die Dichte der Pflanzenmasse pro Flächeneinheit bestimmt ist. Die auszubringende Düngermenge wird in Echtzeit berechnet und über eine geeignete Applikationstechnik ausgebracht. Das CROP-Meter wird seit 2004 in der Praxis eingesetzt; nach Angaben von Leithold (2004, S. 27) sind in Deutschland bislang acht Exemplare im Einsatz.

Neben den genannten Offline- und Onlineverfahren zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung besteht auch die Möglichkeit, die beiden Ansätze zu kombinieren, da jeder sich durch spezifische Vor- und Nachteile auszeichnet: Mit dem Offlineansatz werden kleinräumig variierende Nährstoffgehalte im Boden bei der Düngung berücksichtigt. Onlineverfahren hingegen messen die Nährstoffversorgung der Pflanzen; zudem setzt ihr Einsatz kein Positionierungssystem voraus. Kombinierte Systeme können durch Zusammenführen von Ergebnissen beider Verfahren auf einer breiteren Datenbasis die erforderliche Düngemenge berechnen. Dadurch soll eine bessere Anpassung an den tatsächlichen Stickstoffbedarf der Pflanzen im Vegetationsverlauf und deren Deckung durch Bodennährstoffe sowie eine noch genauere Bestimmung des Düngebedarfs möglich sein. Allerdings befinden sich die kombinierten Systeme derzeit noch in der Entwicklung.

Abbildung 5

CROP-Meter zur Messung der Pflanzenmassedichte für die Stickstoffdüngung



Quelle: Ehlert et al. 2004, S. 43

4. Pflanzenschutz

Die wichtigsten Pflanzenschutzmaßnahmen richten sich gegen Unkräuter, Pilz- und Insektenbefall, wobei im konventionellen und integrierten Landbau i. d. R. chemisch-synthetische Pflanzenschutzmittel (PSM) zum Einsatz kommen. Zusätzlich werden im Getreideanbau Wachstumsregler eingesetzt: Diese verringern das – vor allem bei hoher Stickstoffversorgung (zu) starke – Längenwachstum der Halme und verhindern so die Entstehung von Lagergetreide. Im ökologischen Landbau, der auf den Einsatz chemisch-synthetischer PSM verzichtet, werden stattdessen präventive pflanzenbauliche Maßnahmen, mechanische oder thermische Verfahren der Unkrautbekämpfung sowie unter restriktiven Bedingungen eine Anzahl von v. a. biologischen und auf Kupfer basierenden Präparaten verwendet. Pflanzenschutzmaßnahmen sind für die Ertragssicherung essenziell, aber auch mit einem großen monetären Aufwand verbunden; außerdem können sie unerwünschte Umweltwirkungen verursachen (z. B. Rückstände im Grund- bzw. Oberflächenwasser, Gefährdung von Nützlingen, Rückgang der Artenvielfalt).

Da Unkräuter, Krankheiten und Schädlinge meist nicht den gesamten Kulturpflanzenbestand befallen, sondern nur bzw. hauptsächlich auf bestimmten Teilflächen auftreten, könnte bei einer gezielten teilflächenspezifischen Applikation von PSM der gleiche Bekämpfungserfolg erreicht werden wie bei einer flächeneinheitlichen Behandlung, bei einer gleichzeitigen Reduktion der ausgebrachten PSM-Menge und der damit verbundenen Kosten. Teilflächenspezifische Pflanzenschutzmaßnahmen kamen bereits in den 1960er und 1970er Jahren auf dem Gebiet der Insektenbekämpfung zur Anwendung. Neue PA-Technologien sollen heute weitere Anwendungen ermöglichen. Als Datenbasis für entsprechende Pflanzenschutzmaßnahmen werden – je nach Anwendung – kleinräumig erfasste Daten zum Unkraut-, Krankheits- oder Schädlingsbefall sowie zu den aktuellen Witterungsbedingungen benötigt. Im Pflanzenschutz werden Offlineverfahren derzeit lediglich zur Unkrautbekämpfung und bei der Ausbringung von Halmverkürzungsmitteln in Getreide herangezogen. Bei der teilflächenspezifischen Bekämpfung von Pilz- und Schädlingsbefall werden dagegen Onlineverfahren – etwa auf Basis des CROP-Meters – verwendet.

Herbizideinsatz

Unkräuter konkurrieren mit den Kulturpflanzen um die Ressourcen Wasser, Nährstoffe und Licht. Sind sie auf dem Acker stark vertreten, so führt dies zu einer suboptimalen Entwicklung der Kulturpflanzen mit der Folge von Ertragseinbußen. Darüber hinaus können damit auch Erschwernisse bei der Ernte sowie höhere Reinigungskosten des Ernteguts einhergehen (Lettner et al. 2001, S. 108). Nach Expertenschätzungen werden in Deutschland 80 bis 95 Prozent der Raps- und Getreideflächen mit Herbiziden behandelt, ebenso 99 Prozent der Zuckerrüben- und Maisflächen sowie rund 30 Prozent der Kartoffelflächen (Zwerger et al. 2004, S. 32). Die Unkräuter sind meist nicht homogen auf dem Acker verteilt, sondern treten konzentriert auf bestimmten Teilflächen auf, z. B. in Form so genannter Unkrautnester (z. B. bei Quecke, Ackerkratzdistel oder Trespenarten). Für eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung muss diese räumliche Verteilung des Unkrautbestands bestimmt werden. Davon ausgehend kann der zu erwartende wirtschaftliche Schaden abgeschätzt und bei Überschreiten der wirtschaftli-

chen Schadensschwelle der genaue Ort einer teilflächenspezifischen Maßnahme bestimmt werden.

Die Erfassung der Unkrautverteilung kann im Rahmen von Offlineverfahren mit Hilfe von Satelliten- oder Luftbildern erfolgen. Je nach Auflösung sind bei diesen Ansätzen zwar Unkrautnester, nicht jedoch einzelne Unkrautpflanzen erkennbar. Ein denkbares Anwendungsgebiet für diese Verfahren ist die Unkrautbekämpfung auf abgeernteten Feldern, weil hier das Grün der Unkrautnester auf den Fernerkundungsbildern vom Gelb der Getreidestoppel unterschieden werden kann. Mit Geografischen Informationssystemen und Bildbearbeitung lassen sich die Nester georeferenzieren und nach Bearbeitung der Daten mit computergestützten Entscheidungsmodellen Applikationskarten erstellen. Dieses Vorgehen ist allerdings nur bei großen Feldern lohnenswert. Die manuelle Bonitur der Verunkrautung stellt eine andere Möglichkeit der Datenerfassung dar, die jedoch sehr zeit- und kostenintensiv ist, da man hierfür bis zu zweieinhalb Stunden/ha braucht.

Weitere Ansätze bestehen in der Verwendung neuronaler Netze unter Nutzung von Daten eines Spektrophotometers bzw. im Einsatz von multispektralen Digitalkameras mit nachgeschalteter Bildverarbeitung, die eine artenbezogene Unkrauterkennung sowie die Unterscheidung zur Kulturpflanze möglich machen. Die mit Hilfe der Digitalkamera erfassten Bilder werden mit einer Datenbank verglichen und darauf aufbauend wird eine Applikationskarte zur selektiven Bekämpfung der Unkräuter erstellt. Der ganzjährige Einsatz dieses Systems ist derzeit noch nicht möglich, da sich die Pflanzen im Zeitverlauf stark verändern und es hierdurch zu gewissen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Unkräuter kommt (Ganzelmeier 2004, S. 94).

Onlineverfahren besitzen gegenüber Offlineverfahren auf Basis von Fernerkundungsdaten den Vorteil, dass Informationen über den aktuellen Unkrautbesatz mit einer höheren räumlichen Auflösung gewonnen werden können. Zudem ermöglichen sie eine zeitnahe Erkennung und Bekämpfung der Unkräuter. Forschung und Entwicklung konzentrieren sich auf Verfahren zur Unkrauterkennung mittels optoelektronischer Sensoren in Verbindung mit Bildanalysetechniken. Diese Verfahren basieren darauf, dass Licht im Rot- und Infrarotbereich von grünen Pflanzen anders reflektiert wird als vom umgebenden Boden bzw. abgestorbenen Pflanzenteilen. Dieses Messprinzip ist sehr empfindlich gegenüber den Umgebungsbedingungen. Natürliche Veränderungen in der spektralen Zusammensetzung des Umgebungslichts durch Wolkenbildung oder unterschiedlichen Sonnenstand, Unterschiede in der Bodenfarbe (Sand oder Moor) sowie die Stellung der Pflanzenblätter zur Reflexionsachse, bewirken erhebliche Messwertabweichungen. Für den Praxiseinsatz müssen die Onlineverfahren die Unkräuter erstens sicher und in einem möglichst frühen Entwicklungsstadium erkennen, und zweitens praxisübliche Fahrgeschwindigkeiten von 10 km/h und mehr ermöglichen.

Bei der bereits auf dem Markt verfügbaren „Spot-Spraying-Technik“ (z. B. Detectspray®) befindet sich vor jeder Herbiziddüse ein optoelektronischer Sensor. Bei Erkennung von „Grün“ wird ein Magnetventil geöffnet und die erforderliche Herbiziddosis appliziert. Die Verwendung von sensorgestützten Ansätzen zur differenzierten Unkrautbekämpfung beschränkt sich allerdings derzeit auf Kulturen mit weiten Reihenabständen (z. B. Mais und Zuckerrüben), die Herbizidbehandlung vor dem Auflaufen der Kulturpflanzen sowie u. a. auf Anwendungen im Bereich von Bahnschienen (Ehlert/Dammer 2002, S. 277). In Kulturen mit engem Reihenabstand (z. B. Getreide und Raps) ist der Einsatz optoelektronischer Systeme noch nicht praxisreif (Ehlert/Dammer 2002; Lettner et al. 2001, S. 121). Systeme, die mehr als zwei verschiedene Wellenlängen des Lichts nutzen, sind in der Entwicklung. Eine erste „sehende“ Feldspritze, die mit Hilfe von photooptischen Sensoren verschiedene Unkräuter und Ungräser nach Art und Menge untereinander und von den Kulturpflanzen unterscheiden kann, ist nach langjähriger Entwicklungszusammenarbeit von der Firma Kverneland mit den Universitäten Hohenheim und Bonn bis zur Praxisreife entwickelt worden. Durch die PSM-Applikation mit der Drei-Kammer-Spritze, die bis zu drei verschiedene Wirkstoffe verteilen kann, ist es möglich, die PSM nur dort auszubringen, wo der Bestand an Unkräutern (und Ungräsern) die Schadensschwelle überschreitet, und die Ausbringmenge an den Befallsdruck anzupassen (Anonym 2005a).

Da im ökologischen Landbau auf den Einsatz chemisch-synthetischer PSM verzichtet wird, spielen hier die mechanische Unkrautregulierung und die thermische Unkrautregulierung (mittels Flammen, heißer Luft oder heißem Wasserdampf) eine wichtige Rolle. Bei der mechanischen Bekämpfung von Unkräutern wird versucht, diese mit Hilfe geeigneter Geräte (insbesondere Hacken oder Striegel) auszureißen bzw. zu beschädigen und so ihre Entwicklung zu unterbinden. Ein Ansatz für die Nutzung von PA in der mechanischen Unkrautbekämpfung stellt die sensorgesteuerte Querhacke dar: Diese soll innerhalb der Reihe Unkräuter von Kulturpflanzen unterscheiden und somit eine selektive mechanische Bekämpfung ermöglichen. Einer kommerziellen Fertigung und Vermarktung der Querhacke stehen bislang zu hohe Kosten sowie eine zu geringe Schlagkraft entgegen. Für eine „echte“ teilflächenspezifische mechanische oder thermische Unkrautregulierung müsste – analog zur konventionellen Unkrautbekämpfung mit PSM – der Unkrautbestand kleinräumig differenziert erfasst werden. Insbesondere bei thermischen Verfahren könnte durch eine solche Differenzierung der relativ hohe Bedarf an fossilen Brennstoffen und die damit verbundenen Kosten und CO_2-Emissionen reduziert werden.

Variation des Fungizideinsatzes

Pilzliche Krankheitserreger, wie z. B. die Fusarien im Getreidebau oder Phytophthora infestans als Erreger der Kraut- und Knollenfäule bei Kartoffeln, zählen zu den bedeutendsten Schaderregern in der Landwirtschaft. Entsprechend spielt die Ausbringung von Fungiziden eine bedeutende Rolle in der Ertragssicherung. Dies zeigt sich auch daran, dass fast ein Drittel (10 000 t) der im Jahr

2003 in Deutschland verkauften Menge an PSM (insgesamt: 35 000 t) Fungizide waren (BMVEL 2004a). Eine gezielte Bekämpfung von Pilzkrankheiten auf Teilflächen ist schwierig, da die Ausbreitung der Krankheitserreger durch das komplexe Zusammenspiel zahlreicher Faktoren bestimmt wird, die zum einen die Anfälligkeit der Pflanzen, zum anderen die Vermehrung der Pilze beeinflussen (Standortbedingungen, Sortenanfälligkeit, Stickstoffdüngung, aktuelle Witterung usw.). Von Bedeutung für den Infektionsverlauf ist außerdem die Menge und Verteilung der Erreger, die praktisch nicht vorhergesagt werden kann, da Pilzinfektionen in der Inkubationszeit häufig ohne Symptome verlaufen. Ansätze für Offlineverfahren, die auf Basis von Standort- und Pflanzenparametern Applikationskarten erstellen, existieren daher bislang nur für spezielle Anwendungen: So wurde in Weinlagen Kaliforniens mit Hilfe von Multispektralbildern des Satelliten IKONOS der Blattflächenindex gemessen, der mit dem Auftreten von Pilzkrankheiten korreliert. Die Verwendung von Nahinfrarot-Spektrometern zur Erkennung eines Krankheitsbefalls stellt eine interessante Alternative zur Detektion von Pilzbefall dar; sie ist jedoch noch zu teuer, um in der landwirtschaftlichen Praxis eingesetzt werden zu können.

Zurzeit sind keine fahrzeuggestützten Sensoren für einen Onlineansatz verfügbar, die einen Krankheitsbefall anzeigen bzw. den zugehörigen Krankheitserreger bestimmen können (Ehlert/Dammer 2002, S. 277). Es ist jedoch möglich, die Wahrscheinlichkeit abzuschätzen, mit der auf bestimmten Teilflächen mit einer Pilzinfektion zu rechnen ist. In entsprechenden Prognosemodellen und Expertensystemen spielt der Witterungsverlauf zur Simulation einer Befallssituation eine wichtige Rolle, da dieser den größten Einfluss auf die Entwicklung von Pflanzenkrankheiten hat. Die relevanten Parameter können sehr kleinräumig variieren: So ergaben Temperaturmessungen innerhalb eines heterogenen Feldes Differenzen von bis zu 7,5 °C zum Ährenschieben des Winterweizens. Die errechneten Infektionswahrscheinlichkeiten für die jeweiligen Erreger signalisieren dem Landwirt, dass er die gefährdeten Bestände kontrollieren muss, um bei Erreichen bestimmter Schadensschwellen gezielt Pflanzenschutzmaßnahmen einzuleiten. Dies kann dazu beitragen, dass eine Pilzkrankheit bereits im Frühstadium erkannt und erfolgreich bekämpft wird, was den Fungizidaufwand verringern würde. Die Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes können kleinräumige Wetterphänomene nicht erfassen; da deren Kenntnis für o. g. Zwecke jedoch nötig ist, bieten sich kleine Wetterstationen zur spezifischen Feldüberwachung an.

Zur Erkennung von Pilzbefall mit Hilfe von Sensoren gibt es verschiedene Forschungsansätze. Ein Verfahren basiert auf der Eigenschaft des Chlorophylls, einen geringen Teil des von ihm absorbierten Lichts – etwa 2 bis 3 Prozent – im dunkelroten Spektralbereich als Fluoreszenzlicht abzustrahlen (Chlorophyllfluoreszenz). In Stresssituationen wird die Nutzung der Lichtenergie für die Photosynthese gestört und durch den damit verbundenen „Energierückstau“ die Fluoreszenz verstärkt. Allerdings zählen zu den die Fluoreszenz erhöhenden Stressfaktoren außer Pilzbefall auch Hitze, Kälte, Trockenheit und Nährstoffmangel. Wenn von einer Messung der Chlorophyllfluoreszenz auf Pilzinfektionen geschlossen werden soll, müssen daher die o. g. weiteren Einflussfaktoren berücksichtigt bzw. ausgeschlossen werden. Untersuchungen zum Einsatz der Chlorophyllfluoreszenzanalyse unter Praxisbedingungen existieren bislang nicht. Vorgesehen ist die Aufnahme der Fluoreszenz mit Hilfe von fahrzeuggestützten Lasersystemen, was den Vorteil hätte, dass der „Pflanzenstress“ im Feld sehr kleinräumig detektiert werden könnte; zudem wären Messungen auch nachts möglich. Allerdings sind ggf. zusätzlich zeitaufwendige Feldbegehungen nötig, um die o. g. anderen möglichen Stressursachen auszuschließen.

Ein zweiter Ansatz zur teilflächenspezifischen Fungizidanwendung nutzt die Analyse von Multispektralbildern, um Pathogene auf der Pflanzenoberfläche zu erkennen. Verschiedene Wellenlängen werden eingesetzt, um mit Hilfe bestimmter Indizes kranke von gesunden Blättern zu unterscheiden. In einer Untersuchung über den Befall mit Weizenbraunrost gelang diese Unterscheidung allerdings erst zu einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, als es für einen Fungizideinsatz bereits zu spät war. Auch die Oberflächentemperatur der Blätter kann als Indikator für einen möglichen Pilzbefall verwendet werden, da ein Pilzbefall die Transpiration, d. h. die Verdunstung von Wasser auf der Pflanzenoberfläche verändert, was wiederum Einfluss auf die Oberflächentemperatur hat. Allerdings unterliegt auch die Blatttemperatur wieder zahlreichen weiteren Einflussfaktoren (z. B. der Wasserversorgung der Pflanze), die bei der Analyse berücksichtigt werden müssten. Die „Temperaturmethode“ befindet sich im Forschungsstadium – ob eine Praxiseignung erreicht werden kann, ist derzeit noch nicht abschätzbar.

Schließlich können auch lebende Organismen oder Teile von ihnen genutzt werden, um pilzinfizierte Pflanzen im Bestand auszumachen. So wurde beispielsweise ein Biosensor entwickelt, bei dem die Antennen des Kartoffelkäfers benutzt werden, um Befallsherde der Kraut- und Knollenfäule (Phytophthora infestans) in Kartoffelbeständen zu identifizieren. Duftstoffe, die von den befallenen Stellen ausgehen, werden von den Antennen in elektrische Signale umgewandelt. Ein Nachteil dieser Methode liegt in der geringen Lebensdauer der Antennen und der daraus folgenden häufigen Neubestückung.

Ein anderes, sehr einfaches Verfahren zur differenzierten Fungizidapplikation im Kulturpflanzenbestand verwendet nicht den Pilzbefall als Kriterium, sondern die Pflanzendichte. Diese ist in heterogenen Feldern variabel, d. h. in bestimmten Teilbereichen stehen die Pflanzen dichter bzw. sind kräftiger als in anderen. Ziel des Verfahrens ist es, eine annähernd gleiche Konzentration der fungiziden Substanz auf der Pflanzenoberfläche zu erreichen. In weniger wüchsigen Teilflächen muss demzufolge weniger Spritzbrühe ausgebracht werden als in wüchsigen. Als Sensor dient der CROP-Meter, dessen Ausschlagwinkel mit der Pflanzenmasse und damit auch mit der Blattoberfläche der Pflanzen positiv korreliert ist (Kap. III.3). Dabei kann die Fungizidmenge im Echtzeitverfahren ange-

passst werden. Inzwischen sind spezielle Feldspritzen verfügbar, die eine automatische Anpassung der Applikationsmenge während der Fahrt erlauben. Die mögliche Spanne der Applikationsmenge hängt dabei von der Spritztechnik und der Düsenwahl ab. Standarddüsen ermöglichen i. d. R. nicht die erforderliche Variationsbreite. Hingegen sind mit Zweistoffdüsen (Luft-/Flüssigkeitsdüsen, z. B. dem „AirMaric“ von der Firma TeeJet) Variationsbreiten von etwa eins zu drei zu erreichen. Feldspritzen mit Mehrfachdüsenträgern (z. B. dem „VarioSelect®“ von der Firma Lechler) erlauben das Ausbringen der Spritzbrühe in einem relativ breiten Mengenbereich von eins zu acht.

Variation des Insektizideinsatzes

Für eine teilflächenspezifische Bekämpfung von Schadinsekten müssen besondere Bedingungen berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu Unkräutern und Pilzbefall sind Insekten in hohem Maße mobil – zwischen der Erfassung des Insektenbefalls und einer entsprechenden Bekämpfungsmaßnahme darf daher nur sehr wenig Zeit vergehen. Manuelle Bonituren sind wie bei der Unkrautbekämpfung zu arbeitsaufwendig. Zwar können Farbschalen und Pheromonfallen verwendet werden, um die Insekten anzulocken und dabei ihre Flugaktivität zu messen; allerdings lässt sich auf diese Weise kaum ein Ortsbezug herstellen, da Insekten aus der Umgebung angezogen werden.

Grundsätzlich wäre es – analog zur Behandlung von Pilzkrankheiten – möglich, für Teilflächen die Wahrscheinlichkeit eines Insektenbefalls abzuschätzen, sofern Parameter bekannt sind, die dies für betreffende Insektenarten ermöglichen. Allerdings liegen Untersuchungen auf diesem Feld nicht vor. Ein Verfahren, das auf einem direkten sensortechnischen Nachweis von Schadinsekten in Kulturpflanzen basiert, ist die Radarmethode. Sie wird bereits erfolgreich zum Langzeitmonitoring von Insekten angewandt, die zu Massenvermehrungen neigen (z. B. Wanderheuschrecken). Für eine teilflächenspezifische Spritzentscheidung ist jedoch auch die Radarmethode ungeeignet, da stationäre Bodenradars nur einen begrenzten Luftraum überwachen und daher nur den Zeitpunkt des Einwanderns von Insekten in das Feld anzeigen könnten.

Variation des Wachstumsreglereinsatzes

Wachstumsregulatoren werden im Getreideanbau eingesetzt, um das Längenwachstum der Halme zu reduzieren und so die Entstehung von Lagergetreide zu verhindern. Auf heterogenen Feldern müssen die Pflanzen in schwach wüchsigen Teilbereichen nicht so stark zum Erzielen der notwendigen Standfestigkeit eingekürzt werden als in stärker wüchsigen. Das Expertensystem proPlant kann genutzt werden, um zu differenzierten Mengenempfehlungen in Form einer Applikationskarte zu gelangen (Offlineansatz). Zur Bestimmung der Bestandsdichte kann auch auf einen CROP-Meter (Pendelsensor) zurückgegriffen werden. Unter Praxisbedingungen wurde dieser Ansatz als Offlineverfahren im Rahmen des preagro Verbundprojekts zur Applikation von Chlormequat-Wachstumsregler in Winterweizen erprobt. Eine Onlineapplikation ist prinzipiell ebenfalls möglich, sofern es sich um spät einsetzbare Wachstumsregler (z. B. auf Basis des Wirkstoffs Trinexapac) handelt.

5. Ernte

Die Ertragskartierung im Zuge der Ernte stellt ein wichtiges Element von PA dar (Kap. II.2). Sie ist jedoch vielmehr eine Informationsgrundlage für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung als eine eigentliche PA-Anwendung.

Bereits seit mehreren Jahren wird die mengenmäßige Ertragsmessung im Mähdrescher forciert. Anschließend wurden Feuchtemessungen und später Karten der standardisierten Kornfeuchte erstellt. Die Ertragskartierung mit einer angeschlossenen Feuchtebestimmung ist notwendig, um Fehler in der Erfassung der Erntemenge zu minimieren. Für die Feuchtebestimmung gibt es zwei Möglichkeiten, entweder in der Korntankbefüllschnecke oder im Bypasssystem am Körnerelevator. Diese Sensoren arbeiten mit einem Fehler von ca. 1 bis 20 Prozent bzw. 2 bis etwa 35 Prozent Kornfeuchte. Bei über 40 Prozent Feuchte sind sie nicht mehr einsetzbar.

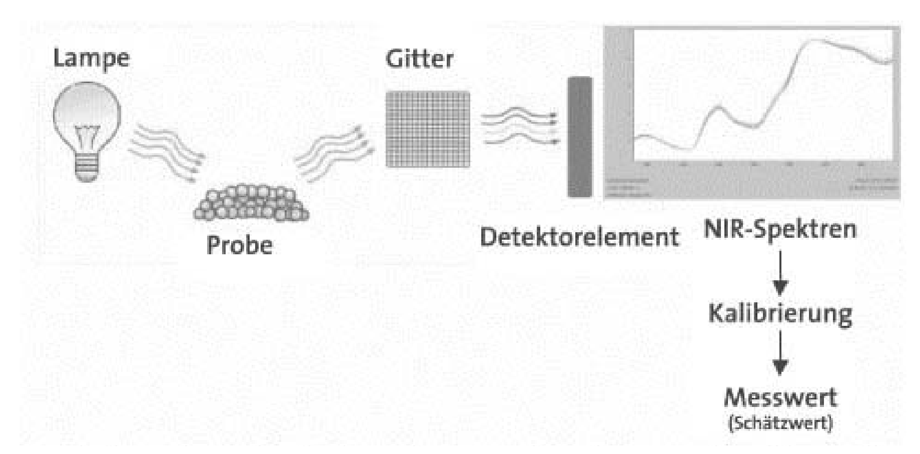
Ähnlich den Ertragsschwankungen existieren teilflächenspezifisch auch Schwankungen der Anteile an Wert bestimmenden Inhaltsstoffen. Forschung und Entwicklung sind dabei, die qualitätsbestimmenden Faktoren des Ernteguts während der Ernte zu erfassen und an die georeferenzierten Daten anzuhängen. Ein Ansatz ist die Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS), ein schnelles berührungsloses Verfahren zur Ermittlung von qualitätsbestimmenden Inhaltstoffen (z. B. Gehalt an Protein, Öl, Stärke) im Druschgut (Abb. 6): Eine Lichtquelle bestrahlt die zu untersuchende Probe. Das von der Probe reflektierte Licht wird von einem Spektrometer erfasst. Es ermittelt im Wellenlängenbereich von etwa 900 bis 1 700 nm zu jeder Wellenlänge die Reflektion und stellt die Daten als Spektrum dar.

Die optischen Informationen gehen in eine Kalibrationsgleichung ein mit deren Hilfe die Konzentration der gesuchten Komponente (z. B. Proteingehalt) errechnet werden kann. Diese Messtechnik kann in den Mähdrescher integriert werden, um die Qualität des in einem Bypass fließenden Getreides zu messen. Neben der technischen Realisation des Verfahrens liegt die Hauptaufgabe der Entwicklungsarbeit darin, hinreichend genaue, spezifische Kalibrierungen zu entwickeln. Diese sollen die Reflektionswerte der NIRS-Sensoren in möglichst präzise Werte für den Proteingehalt umwandeln. Die Kalibrierungen für den Protein- und Feuchtegehalt von Winterweizen liefern inzwischen Messwerte mit ausreichend hoher Genauigkeit, für Körnermais gelingt dies allerdings nur beim TS-Gehalt. Für Raps und Gerste sind weitere Daten erforderlich, um stabile Kalibrierungen zu erstellen.

Die Qualitätsmessergebnisse werden auf dem Mähdrescher mit den Daten der Ertragserfassung synchron aufgezeichnet. Die Verknüpfung der Messwerte (z. B. zu Protein) mit den satellitengestützten Koordinaten macht die

Abbildung 6

Prinzip der Nahinfrarot-Spektroskopie



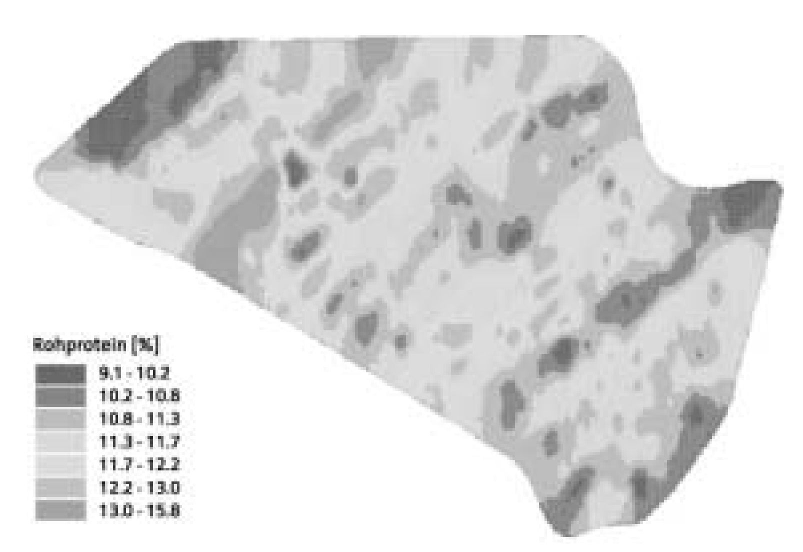
Quelle: Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik, Christian-Albrechts-Universität Kiel

großflächige Kartierung der Inhaltsstoffe auf einem Feld möglich. Die Karte lässt eine dem Ertrag ähnliche Variabilität erkennen und es können Teilflächen identifiziert werden, die sich mit ihren Gehalten deutlich von anderen unterscheiden (Abb. 7). Die Onlinequalitätsmesssung stellt damit eine weitere Informationsgrundlage bzw. ein Qualitätskontrollsystem dar, um in Kombination mit anderen teilflächenspezifisch messbaren Parametern die kleinräumigen Besonderheiten eines Feldes aufzuspüren und mit teilflächenspezifischen pflanzenbaulichen Maßnahmen darauf reagieren zu können.

Für die konventionelle Landwirtschaft werden mögliche Anwendungsfelder einer teilflächenspezifischen Ernte derzeit nicht diskutiert, wären aber in bestimmten Fällen denkbar, etwa bei Fusarienbefall in Getreide. Für den ökologischen Landbau ist dagegen die teilflächenspezifische Ernte eine interessante Option: Da hier aufgrund suboptimaler Stickstoffversorgung der Pflanzen häufig nicht die für Qualitätsgetreide erforderlichen Proteingehalte erreicht werden, könnten künftig Teilflächen mit ausreichend proteinhaltigem Korn getrennt vom restlichen Bestand abgeerntet und vermarktet werden (TAB 2004).

Abbildung 7

Proteingehalt eines Winterweizenfeldes



Quelle: Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

6. Automatische Spurführung

Die Feldbewirtschaftung bei der pflanzlichen Produktion erfolgt in der Regel fahrzeuggestützt in parallelen Streifen mit vorgegebener Arbeitsbreite. Für eine vollständige Bearbeitung des gesamten Feldes ist dabei ein Spuranschluss erforderlich, den der Landwirt unter Nutzung verschiedener Hilfsmittel (optisch wahrnehmbare Markierungen, z. B. Bearbeitungs- oder Bestandskanten) zu erreichen versucht. Wie präzise der Spuranschluss erfolgen muss, hängt vom konkreten pflanzenbaulichen Verfahren ab. Grundsätzlich sind Fehler im Spuranschluss möglichst gering zu halten, da sie sich – durch Auslassung oder Überlappung – negativ auf die Arbeitsqualität, den Betriebsmitteleinsatz und somit auf das betriebswirtschaftliche Ergebnis und die Umwelt auswirken. Je nach Maßnahme stellt das Einhalten der Spur für den Fahrzeugführer eine erhebliche Belastung dar.

Durch die Nutzung von Satellitennavigation sind automatische Spurführungssysteme möglich, die die Feldarbeitsmaschinen entlang vorgegebener virtueller Leitlinien exakt in der Spur führen. Solche Systeme können helfen, Fahrfehler zu vermeiden, die Präzision des Spuranschlusses zu verbessern sowie einen Teil der hohen ergonomischen Belastungen des Fahrers bei der Steuerung des Fahrzeugs abzubauen.

Ein Ansatz zur automatischen Spurführung ist die *visuelle Lenkhilfe*, die die Spurabweichung gegenüber vorher definierten virtuellen Leitlinien anzeigt und ihre manuelle Korrektur ermöglicht. Verschiedene Firmen bieten entsprechende satellitengestützte Spurführungssysteme an. Ein waagerechter, beweglicher Lichtbalken, dargestellt auf einer Anzeige in der Fahrerkabine, dient dabei als Richtungsgeber und signalisiert dem Fahrer Spurabweichungen. Die praktischen Erfahrungen mit solchen Systemen zeigen allerdings, dass ein Fahrer nicht über längere Zeiten absolut präzise der Anzeige solcher Systeme mit dem Lenkrad folgen kann. Zudem ist zu bemerken, dass mit dieser Technik nur Verbesserungen auf Flächen ohne Regelspuren erzielt werden können. Maßnahmen, die vor dem Anlegen der Regelspuren durchgeführt werden, können jedoch von den Spurführungssystemen profitieren.

Ein zweiter Ansatz zur automatischen Spurführung besteht in der Verwendung eines *Autopiloten*. Dieser folgt ebenfalls mit Hilfe von satellitengestützten Ortungssystemen vorgegebenen Spuren, passt die Spur des Fahrzeugs aber ohne Zutun des Landwirts durch automatische Ansteuerung der Lenkhydraulik der Vorgabe an. Alle nicht reihengebundenen Arbeiten (Düngen und Spritzen ohne Fahrgassen, Bodenbearbeitung, Drill- und Einzelkornsaat) können auf diese Weise präzisiert werden (Strecker et al. 2004a, S. 33). Ein Beispiel ist das System „StarFire“ der Firma John Deere, das mit dem „AutoTrac“ die zeitweise automatische Fahrzeuglenkung ermöglicht. Der „Auto-Guide“ des Herstellers Fendt zur automatischen Spurführung ging im Oktober 2004 in die Serienfertigung; bis März 2005 waren 250 Systeme ausgeliefert (SZ 2005). Es ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren verbesserte Lösungen zur teilautomatischen Führung von Fahrzeugen im landwirtschaftlichen Bereich auf den Markt kommen werden. Die zu erwartenden Fahrerassistenzsysteme zur teilautomatischen und automatischen Fahrzeugführung werden im Vergleich zu den heute verfügbaren Verfahren stark verbessert und funktionell erweitert sein (Schraut 2000, nach Ehlert et al. 2004, S. 30). Die Einführung dieser Techniken erfordert allerdings neben der Klärung gesetzlicher Zulassungsvorschriften die Bereitstellung zusätzlicher sicherheitsrelevanter Informationen, die Qualitätsprüfung der Daten und die Verfügbarkeit von Vorabinformationen über Korrektur- und satellitengestützte Ortungssignale in der Einsatzregion.

7. Dokumentation und Rückverfolgbarkeit

Von der Politik wird immer mehr der Verbraucherwunsch nach lückenloser Rückverfolgbarkeit der landwirtschaftlichen Produktion aufgegriffen und in unterschiedliche Gesetzesaktivitäten umgesetzt. Darüber hinaus fordern immer mehr Abnehmer landwirtschaftlicher Erzeugnisse einen „Warenbegleitschein“. Dies zeigt sich bereits bei der Produktion von Veredlungskartoffeln und Zuckerrüben sowie vereinzelt auch im Bereich der Qualitätsgetreideerzeugung.

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie Entwicklungen am Markt lassen aber auch in der pflanzlichen Erzeugung eine verbreitete Dokumentationsverpflichtung zur Art der Erzeugung, wie sie bereits im ökologischen Landbau üblich ist, erwarten. So ist z. B. im neuen Bundesnaturschutzgesetz eine generelle Aufzeichnungspflicht für Düngungs- und Pflanzenschutzmaßnahmen vorgeschrieben. Es wird erwartet, dass in den nächsten zwei bis drei Jahren diese Vorgaben in entsprechende Landesgesetze umgesetzt werden. Seit einigen Jahren besteht bereits die Verpflichtung, einen Nachweis über die Einhaltung der richtigen Abstände entlang von Büschen, Gewässern und Nichtzielflächen bei der Durchführung von Bewirtschaftungsmaßnahmen zu erbringen. Hier bietet der Einsatz von PA nicht nur die Möglichkeit, die geforderten Abstände genau einzuhalten, sondern dies auch zu dokumentieren. Es wird erwartet, dass die Dokumentationspflichten in der Zukunft weiter ansteigen und möglicherweise auch zeit- und raumspezifische Informationen dokumentiert werden müssen. So sieht ein Vorentwurf des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft für eine neue Düngeverordnung feldbezogene Aufzeichnungs- und Bilanzierungsvorschriften für Stickstoff und Phosphat sowie Abstandsauflagen für die Ausbringung von Düngemitteln in der Nähe von Gewässern vor.

Die Aufzeichnungen von Betriebsabläufen und produktionstechnischen Maßnahmen stellen hohe Anforderungen an die Landwirte, sind zeitaufwendig und erfordern eine gute Organisation bei der Datenverwaltung. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt führen viele Landwirte ihr eigenes Dokumentationssystem entweder handschriftlich oder als elektronische Ackerschlagkartei. Neue Gesetze, Verordnungen und Regelungen, wie z. B. die Erweiterung des Lebensmittel- und Produkthaftungsrechts auf Agrarprodukte oder die Direktzahlungsverpflichtungen der Agrarreform im Zusammenhang mit Cross Compliance, führen

zu einem erhöhten Dokumentationsaufwand. Insbesondere die zum 1. Januar 2005 in Kraft getretene EU-Verordnung 187/2002 mit dem generellen Gebot der durchgängigen Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln verpflichtet alle in der Kette der Lebensmittelerzeugung tätigen Unternehmen – also auch die Landwirte – zur genauen Dokumentation aller relevanten Maßnahmen. Der Landwirt muss dokumentieren, welche Betriebsmittel von welchem Lieferanten gekauft wurden, welche Maßnahmen innerhalb der einzelnen Produktionszweige des landwirtschaftlichen Betriebes durchgeführt wurden, und an wen die Produkte verkauft wurden.

Neben der Dokumentation der im Zuge der Produktion durchgeführten ackerbaulichen Maßnahmen könnte zunehmend auch die Lieferung qualitätsbezogener Informationen zu den erzeugten Agrarprodukten zur Voraussetzung für einen Zugang der Landwirte zur Wertschöpfungskette werden. Das Wissen um die Herkunft und die Qualität der Rohstoffe sowie die landwirtschaftliche Produktionsweise werden von der Verarbeitungsindustrie oftmals als notwendig erachtet, um das Vertrauen der Verbraucher in die Produkte zu erhalten und sich durch entsprechendes Marketing Wettbewerbsvorteile zu verschaffen (Ehlert et al. 2004, S. 18). Zudem fordert die Gesellschaft ein administrativ beherrschbares System zur „Kontrolle der Eigenkontrolle“, mit dem entlang einer (auch internationalen) Kette im Fall eines Rückrufes die notwendigen Informationen innerhalb kurzer Zeit bereitstehen. Ein Ansatz, der dies leiten kann, ist die „erweiterte elektronische Schlagkartei“ (Ehlert et al. 2004, S. 18).

8. Stand von Forschung und Entwicklung

Die Forschung auf dem Gebiet PA ist interdisziplinär organisiert. Sie greift auf Aktivitäten in unterschiedlichen Forschungsdisziplinen und Technologiefeldern zurück und verbindet anwendungsorientierte Forschung und Grundlagenforschung miteinander. Die Fragestellungen reichen von grundsätzlichen Fragen des Pflanzenbaus und -managements (Ertragsbildung, Nährstoffdynamik) über technische Aspekte der teilflächenspezifischen Applikation von Betriebsmitteln bis hin zur autonomen Robotik. Geforscht wird auch auf dem Gebiet des Datenmanagements, über Systeme zur Entscheidungsunterstützung und über soziale Effekte des Einsatzes von PA sowie zu Fragen der Akzeptanz.

Die folgenden Forschungsfelder zu PA werden – mit abnehmender Bedeutung – besonders intensiv bearbeitet (Robert 1999, nach Ehlert et al. 2004, S. 74):

- Entwicklung von Echtzeitsensoren für Boden- und Pflanzenparameter,
- Fernerkundung zur Erkennung von Boden- und Pflanzenzuständen,
- Einflüsse von PA auf die Umwelt,
- Entwicklung von Beprobungsmethoden,
- Ökonomie von PA-Praktiken,
- Bestimmung der räumlich-zeitlichen Variabilität natürlicher Ressourcen,
- Methoden der Datenanalyse und -interpretation,
- Beziehungen zwischen natürlichen Wachstumsbedingungen, Input-Größen und Ertrag,
- Entwicklung von praktikablen Wachstumsmodellen für PA,
- Entwicklung von verbesserten Methoden zur Analyse von georeferenzierten Felddaten,
- Entwicklung von Ertragssensoren.

Nachfolgend werden der Stand der Forschung und Entwicklung auf nationaler, europäischer und außereuropäischer Ebene dargestellt und die wichtigsten Forschungsansätze und Projekte zu PA benannt.

Nationale Forschungsförderung

In Deutschland beschäftigen sich zurzeit über 40 Forschungseinrichtungen und Unternehmen unter Inanspruchnahme öffentlicher Fördergelder mit PA. Dazu gehören zahlreiche Hochschulen wie die TU München, die Universitäten Hohenheim und Rostock, die Justus-Liebig-Universität Gießen, die Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, die Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn, die Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, die Humboldt-Universität zu Berlin sowie die Fachhochschule Osnabrück. Außeruniversitäre Forschung zu PA wird betrieben vom Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), dem Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e.V. (ZALF) Müncheberg sowie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) Braunschweig.

Eine Übersicht über die Forschungsansätze und Projekte zu PA, die von diesen Einrichtungen durchgeführt wurden bzw. werden, ist in Ehlert et al. 2004 dargestellt. An dieser Stelle werden nur die nationalen Verbundprojekte zu PA vorgestellt, denen eine besondere Bedeutung zukommt:

- Forschungsverbund Agrarökosysteme München (BMBF): Ziel dieses Projekts (1990 bis 2003) war es, in einem langfristig angelegten Versuch die ökologischen Folgen von zwei unterschiedlichen Bewirtschaftungssystemen in einem Landschaftsausschnitt zu untersuchen und neue umweltschonende und wirtschaftliche Wege der Landbewirtschaftung aufzuzeigen (TU München).
- preagro I (BMBF): Das Verbundprojekt (1999 bis 2003) zielte darauf ab, verschiedene Aspekte des Managementsystems für den ortsspezifischen Pflanzenbau zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Landwirtschaft und zur Förderung ihrer Umweltleistungen zu untersuchen (Federführung: ZALF Müncheberg).
- preagro II (BMBF): Ziel des Verbundprojekts (2005 bis 2007) ist es, die informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit „Precision Farming“ als zentrale Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der land-

wirtschaftlichen Landnutzung zu untersuchen (Federführung: ZALF Müncheberg).

- IKB-Dürnast (DFG): In dem Projekt (1998 bis 2004) wurden ein betriebliches Informationssystem für die Pflanzenproduktion, ein automatisiertes, kleinräumiges Datenerfassungssystem und Referenzwerte für die Onlinesteuerung des Pflanzenwachstums über die N-Düngung entwickelt sowie die kleinräumige Bestandsführung ökonomisch beurteilt (TU München).
- Graduiertenkolleg 722 (DFG): Ziel des interdisziplinären Kollegs (2001 bis 2004; 2004 bis 2007) ist die Erforschung und Entwicklung von Methoden und Techniken zur kleinräumig differenzierten und effizienten Kontrolle von Unkräutern, Pathogenen und Nematoden in Kulturpflanzenbeständen durch die Nutzung innovativer Sensortechnik (Universität Bonn).
- ProSenso.net (BMBF): Das Kompetenznetz (seit 2001) mit 20 Unternehmen und Forschungseinrichtungen zielt auf die Verbesserung der Umweltverträglichkeit und Effizienz landwirtschaftlicher Produktionsverfahren durch den Einsatz innovativer Sensortechnik (Federführung: ATB Bornim).

Mit den genannten Forschungsprojekten konnten nennenswerte Fortschritte bei der Entwicklung von Methoden und Techniken für die Präzisionslandwirtschaft erreicht werden. Allerdings fehlen noch wesentliche Komponenten und Kenntnisse, die erforderlich sind, um die Einsatzmöglichkeiten für PA zu verbessern. Hierzu zählen insbesondere die Sensortechnik für die zeitnahe Erfassung von Boden- bzw. Pflanzenparametern und praxistaugliche Management- und Expertensysteme zur Entscheidungsunterstützung. Weitere Forschungsaufgaben ergeben sich aus dem praktischen Einsatz vorhandener PA-Systeme, durch die Formulierung weiterer Anforderungen seitens der Landwirte sowie aus den agrarpolitischen Rahmenbedingungen und den gesellschaftlichen Anforderungen an die Nahrungsmittelproduktion.

Die nationale Forschung zu PA wird im Wesentlichen finanziert durch Drittmittel, u. a. durch das BMBF, das BMVEL, die DFG, die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) und von den Landesministerien. In den vergangenen zehn Jahren wurden schätzungsweise 18,5 Mio. Euro Projekt-Fördermittel für Forschung im Bereich PA ausgegeben, wobei der überwiegende Teil der Mittel aus dem BMBF (rund 50 Prozent) stammte. Das BMVEL und seine Forschungseinrichtungen sowie die Landwirtschafts- bzw. Forschungsministerien der Bundesländer dürften mit ihren institutionellen Eigenmitteln die PA-Forschung schätzungsweise ebenfalls mit rund 19 Mio. Euro gefördert haben. Hinsichtlich der Industrieausgaben für PA-Forschung ist anzunehmen, dass zusätzlich zu den Eigenanteilen im Rahmen der nationalen Projektförderung (von ungefähr 40 Prozent) ein Vielfaches für Forschungsaktivitäten zu PA ausgegeben wurde.

Europäische Forschungsförderung

Eine Auswertung der Projektdatenbank CORDIS ergab, dass es auf europäischer Ebene rund 250 geförderte Forschungsprojekte zum Thema PA gibt (Ehlert et al. 2004). Davon befassen sich 45 Projekte direkt mit PA-Forschung, während die anderen Projekte dieses Forschungsfeld nur tangieren und eher allgemeinen landwirtschaftlichen Themen, wie der Krankheitserkennung bei Pflanzen und Tieren, der Sensorentwicklung, der Bewässerung, der Biotechnologie und der Politikforschung, zuzuordnen sind. Tabelle 5 enthält Schätzungen zu den Kosten und Fördermitteln für PA-Projekte, die in der CORDIS-Datenbank aufgeführt sind.

In der Übersicht wird deutlich, dass sowohl die für die Entwicklung von PA eingesetzten Mittel insgesamt als auch die durchschnittlichen Ausgaben je Projekt eher gering sind. Unter der Annahme, dass die Differenz zwischen Projektkosten und Projektförderung durch Eigenanteile der Industriepartner getragen wird, hat die europäische Industrie die EU-Projekte im Bereich PA mit rund 20 Mio. Euro mitfinanziert. Da die EU-Förderung aufgrund des hohen administrativen Aufwandes und der niedrigen Förderquote nicht zu den bevorzugten Instrumenten von Unternehmen zur Finanzierung ihrer Forschung zählt, ist davon auszugehen, dass die Industrie ein Vielfaches dieses Betrages in die eigene PA-Forschung, auch unter Inanspruchnahme nationaler Förderprogramme, investiert hat.

Die im Bereich PA angesiedelten EU-Vorhaben befassen sich überwiegend mit der Aufbereitung und Bereitstellung von Daten für Entscheidungsunterstützungs-, Planungs- und Kommunikationssysteme. Die Entwicklung von Datenbanken, IuK-Techniken, interaktiven Systemen und GIS-basierten Anwendungen stehen dabei im Vordergrund. Den zweiten wichtigen Bereich stellen Farm-Management- und Expertensysteme dar, z. B. Empfehlungen zur Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln und zur Ertragsvorhersage.

Die Mehrzahl der FuE-Vorhaben, die sich der PA-Forschung zuordnen lassen, wurde in der Laufzeit des 5. EU-Rahmenprogramms (1998 bis 2002) in den Programmbereichen LIFE QUALITY (Quality of life and management of living resources), IST (Information Society Technologies) und INCO 2 (Confirming the international role of community research) gefördert. Im gegenwärtigen 6. Rahmenprogramm ist die Förderung von PA nicht explizit vorgesehen. Von den EU-eigenen Forschungszentren (JRC) werden zurzeit zwei Vorhaben zur georeferenzierten Boden- und Bestandsanalyse durchgeführt. Ein Erkenntniszuwachs ist auch von einigen Projekten zu erwarten, die in angrenzenden Forschungsgebieten wie der IT- oder der Ökosystemforschung angesiedelt sind.

Außereuropäische Forschungsförderung

International wird in zahlreichen Ländern an PA-relevanten Fragestellungen gearbeitet (Zhang et al. 2000). Veröffentlichungen zu PA liegen aus den USA, Australien, Japan, China, Korea, Indien, Indonesien, Bangladesch, Sri Lanka, der Türkei, Saudi-Arabien, Brasilien, Argentinien, Chile und Uruguay vor. Für viele der technisch oder auch politisch abgeleiteten Forschungsziele zu PA spielt die öffentliche Förderung eine wichtige Rolle. Dies belegen die

Tabelle 5

Übersicht über Kosten und Fördermittel von EU-Projekten zu PA und verwandten Themenbereichen

Themenbereich	Anzahl Projekte	Projekt-kosten (Tsd. Euro)	Projekt-förderung (Tsd. Euro)	Förderquote (%)	∅ Projekt-kosten je Projekt (Tsd. Euro)
Precision Agriculture	45	58.472	38.182	*65*	1.299
weitere landwirtschaftliche Themen	122	286.423	206.225	*72*	2.348
Krankheitserkennung	29	376.226	246.879	*66*	12.973
Sensor- und Methodenentwicklung	15	56.970	41.736	*73*	3.798
Bewässerung	10	14.414	13.063	*91*	1.441
Biotechnologie	16	160.179	131.987	*82*	10.011
Politikforschung	6	14.100	k. A.	k. A.	2.350

Quelle: Ehlert et al. 2004, S. 81

Anstrengungen von Ländern, die den Verbrauch von Betriebsmitteln in der Landwirtschaft reduzieren wollen (z. B. USA) oder strukturelle Änderungen im Agrarsektor anstreben (z. B. Japan, China).

In den USA und Kanada begann die Forschung zu PA Mitte der 1980er Jahre. Ein aktueller Forschungsschwerpunkt in den USA ist die Reduzierung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln (Smith/Thomson 2003, nach Ehlert et al. 2004, S. 82). Ziel ist es, den gegenwärtig hohen Verbrauch (22 Prozent des Weltverbrauchs) zu verringern. Die Forschung hierzu beinhaltet Applikationssysteme und die Vermeidung von Abdrift, die Kulturpflanzen- bzw. Unkrauterkennung, die Bestandsbewertung und die Erkennung von Schäden durch Insekten. Weiterhin wird an der Entwicklung autonomer Maschinensysteme für unterschiedliche Einsatzbereiche, wie z. B. Ernte und Unkrautbekämpfung, gearbeitet.

In Australien liegt ein Forschungsschwerpunkt in der räumlich differenzierten, quantitativen und qualitativen Ertragserfassung, z. B. für Kartoffeln, Erdnüsse und Futterpflanzen. Zur Ertragserfassung von Getreide waren im Jahre 2000 etwa 200 Systeme im Einsatz – im Vergleich dazu sind es in den USA zwischen 5 000 und 10 000 –, von denen die Hälfte satellitenbasiert arbeitet. In diesem Bereich findet weitere öffentliche Forschung statt. Im Baumwollanbau gehört der Einsatz von satellitengestützten Traktorleitsystemen (wie z. B. der australischen Firma BEELINE Technologies) bereits zum Stand der Technik. Außerdem werden luft- und satellitengestützte Bestandserfassungen für das Farmmanagement eingesetzt, so z. B. für die Düngerapplikation. Im Gegensatz zu den o. g. Kulturarten wird für die Entwicklung neuer PA-Technik für den Baumwollanbau kein öffentliches Geld mehr eingesetzt. Die weitere Technikentwicklung basiert hier ausschließlich auf Industrieforschung.

In Japan liegt ein Schwerpunkt der Forschungsarbeiten auf der sensorgestützten Steuerung von Landmaschinen bis hin zu autonomen Systemen sowie auf der Entwicklung teilflächenspezifischer Applikationssysteme für Pflanzenschutzmittel und Dünger. Aktuelle Forschungen betreffen u. a. die Bodenkartierung, die Erfassung des Düngestatus (N-Sensor, Vegetationsindex), die teilflächenspezifische Düngung, die Ertragserfassung, die Fernerkundung und die Verfahrensautomatisierung bis hin zur Robotik (z. B. unbemannte Transporter und Ernteroboter) (Iida 2003). Die japanische Regierung erwartet, dass PA in naher Zukunft auf verschiedenen Betriebsgrößen und -formen eingesetzt werden kann und dann dazu beiträgt, einen Teil der strukturbedingten Probleme in der japanischen Landwirtschaft (z. B. sehr klein parzellierte Flächenstrukturen) zu lösen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden umfangreiche staatliche Fördermittel in den Forschungsbereich „Japanese PA“ gesteckt.

Auch in China werden hohe Erwartungen an die Entwicklung und den Einsatz von PA geknüpft. PA wird als geeignetes Mittel zur Sicherung der Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft unter den chinesischen Bedingungen betrachtet, deren Charakteristika unterschiedliche Anbausysteme und ein geringes Technikniveau sind (Liu et al. 2003). Die umfangreiche staatliche PA-Förderung in China erstreckt sich auf alle Entwicklungsrichtungen, wobei mit regionalem Bezug „traditionelle“, „moderne“ und „High-Tech“-Szenarien für den Einsatz von PA entwickelt werden.

9. Fazit

Anwendungsfelder für PA finden sich in allen wesentlichen Arbeitsschritten des ackerbaulichen Produktionsprozesses von der Bodenbearbeitung bis zur Ernte, aber auch im Bereich der satellitengestützen Spurführung und der Dokumentation. Für einen Großteil der möglichen

Anwendungsfelder existieren verschiedene Ansätze zur Umsetzung einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung; insbesondere im Bereich der Datenerfassung ist eine Vielzahl von technischen Entwicklungen anzutreffen.

Einige PA-Anwendungen haben bislang in Deutschland zu einer gewissen Verbreitung in der Praxis gefunden. Dazu zählt die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung, wobei Onlineansätzen unter Verwendung von optoelektronischen Sensoren (v. a. der Yara N-Sensor®) bzw. dem CROP-Meter (Pendelsensor) die größte Bedeutung zukommt. Bundesweit werden gegenwärtig (Stand 2005) ca. 220 Yara N-Sensoren® auf rund 400 000 Hektar (dies entspricht ca. 3,4 Prozent der bundesdeutschen Ackerfläche) eingesetzt, vornehmlich im Osten, neuerdings aber auch in Niedersachsen und Schleswig-Holstein.

Daneben ist im Bereich des Pflanzenschutzes die differenzierte Herbizidapplikation zu nennen: In Kulturen mit weitem Reihenabstand können optoelektronische Sensoren zur differenzierten Unkrautbekämpfung zwischen den Reihen eingesetzt werden. Leistungsfähigere Sensorsysteme – etwa zur Unterscheidung verschiedener Unkrautarten – befinden sich in der Entwicklung. Eine erste „sehende“ Feldspritze, die Art und Menge der Unkräuter erkennen und diese von den Kulturpflanzen unterscheiden kann und die in der Lage ist, bis zu drei Wirkstoffe gleichzeitig auszubringen und die Aufwandmenge dem Befallsdruck anzupassen, ist bis zur Praxisreife entwickelt worden. Für den indirekten und direkten Nachweis von Pilzkrankheiten und die teilflächenspezifische Ausbringung von Fungiziden sind verschiedene sensorgestützte Ansätze in der Entwicklung. Ein erstes praxisreifes Verfahren zur teilflächenspezifischen Verteilung von Fungiziden und spät einsetzbaren Wachstumsreglern im Pflanzenbestand stellt der CROP-Meter dar.

Im Bereich der satellitengestützten Spurführung sind Angebote für visuelle Lenkhilfen sowie Autopilotsysteme auf dem Markt. Die Zahl der verkauften einfachen Nachrüstsysteme für Traktoren bzw. der ab Werk eingebauten Systeme ist nicht ermittelbar, aber die Vielzahl an Anbietern und eine rege Nachfrage deuten auf eine hohe Akzeptanz bei den landwirtschaftlichen Unternehmern hin. Die Landwirte haben aufgrund der Einsparung von Kosten (Vermeidung von Überlappungen bei Bodenbearbeitung, Ausbringung organischer Dünger etc.) sowie verbesserten Arbeitseinsätzen (eine grundsätzlich verringerte Belastung des Fahrers sowie zusätzliche Arbeitsmöglichkeiten auch bei Dunkelheit, Nebel etc.) großes Interesse an dieser Technik. In diesem Bereich ist in den nächsten Jahren mit einer größeren Anzahl von Neuentwicklungen zu rechnen.

Die Ertragskartierung während der Ernte gehört zu den PA-Elementen mit dem derzeit größten Verbreitungsgrad, stellt aber eher ein Verfahren zur Gewinnung teilflächenspezifischer Informationsgrundlagen als eine eigentliche Anwendung von PA dar. Die Ertragskartierung wird voraussichtlich zukünftig ergänzt werden durch die Onlineerfassung der Qualität des Ernteguts mittels Nahinfrarot-Spektroskopie, ein schnelles berührungsloses Verfahren zur Analyse u. a. von qualitätsbestimmenden Inhaltstoffen (z. B. Gehalt an Protein, Öl, Stärke) mittels Lichtreflexion. Diese Methode stellt ein Qualitätskontrollsystem dar, das in Kombination mit anderen teilflächenspezifisch messbaren Parametern und teilflächenspezifisch angepassten Bewirtschaftungsmaßnahmen eine Optimierung des Produktionsprozesses ermöglichen könnte.

Einige weitere Anwendungen wurden ebenfalls bis zur Praxisreife entwickelt, ohne dass sich bislang eine breitere Anwendung in der Praxis abzeichnet. Hierzu gehören die teilflächenspezifische Grunddüngung und die Kalkung. In Entwicklung befindliche Sensoransätze könnten dazu beitragen, den Aufwand für die notwendigen Bodenbeprobungen auf ein praktikables Niveau zu senken. Die Vorteilhaftigkeit des Verfahrens ist allerdings wegen der allgemein guten Nährstoffversorgung der Böden und dem Prinzip der Vorratsdüngung schwierig zu beurteilen, wird aber aufgrund der in Deutschland in den letzten Jahren oft vernachlässigten Grunddüngung und Kalkung an Bedeutung gewinnen, insbesondere im Bereich der Regulierung von Bodenversauerung.

Für die teilflächenspezifische Anpassung der Bodenbearbeitungstiefe wurden ein Verfahren sowie ein Prototyp der betreffenden Arbeitsgeräte entwickelt. Sie spielt in der Praxis bislang keine Rolle, verspricht bei Vorliegen einer größeren Standortheterogenität jedoch signifikante Kraftstoffeinsparungen. Die teilflächenspezifische Variation der Bearbeitungsintensität stellt sich dagegen zum gegenwärtigen Zeitpunkt als wenig viel versprechend dar.

Mit einer teilflächenspezifischen Anpassung der Saatstärke unter Nutzung von Ertragspotenzialkarten wurden erste Erfahrungen in Praxisbetrieben gesammelt. Bei den klassischen Reihenkulturen (z. B. Mais) und hohen Saatgutkosten lassen sich positive Ergebnisse erzielen. Bei Getreide ist ihre Eignung für eine breite Anwendung zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch fraglich. Dennoch bieten alle renommierten Sämaschinenhersteller ihre Geräte auch mit PA-Ausrüstung an und es werden Verfahren der teilflächenspezifischen Aussaatdifferenzierung bei Getreide und Mais in der Praxis, insbesondere in Trockenlagen, zunehmend nachgefragt und angewandt. Zudem ersparen die so ausgestatteten Sämaschinen die regelmäßig bei Sämaschinen erforderliche Überprüfung der tatsächlichen Aussaatmenge („Abdrehen“ der Säorgane).

Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an die Dokumentation der Produktionsverfahren und Produktqualitäten bietet der Einsatz von PA durch die Vernetzung von satellitengestützter Ortung, sensorbasierten Datenerfassungs- und geografischen Informationssystemen grundsätzlich interessante Möglichkeiten zur automatischen und exakten Erfassung und Dokumentation von Bewirtschaftungsmaßnahmen hinsichtlich Art, Umfang, Zeit und Ort und zum fälschungssicheren Informationsmanagement.

Der Einsatz von PA-Verfahren in der mechanischen und thermischen Unkrautregulierung, in der teilflächenspezifischen Ausbringung organischer Dünger sowie in der

teilflächenspezifischen Ernte von Qualitätsgetreide eröffnet insbesondere für den ökologischen Landbau interessante Anwendungsmöglichkeiten. An der Entwicklung von entsprechenden Verfahren wird teilweise gearbeitet. Darüber hinaus könnten auch im ökologischen Landbau sämtliche PA-Ansätze unter Verwendung satellitengestützter Positionierung und Geografischer Informationssysteme zur Erfassung, automatischen Dokumentation und Auswertung von Daten verwendet werden.

Neben den genannten Anwendungen existieren zahlreiche weitere Ansätze, die sich im Stadium von Forschung und Entwicklung befinden. Dabei stehen Echtzeitsensoren zur Erfassung von Boden- und Pflanzenparametern, Kenntnisse von Prozessen in Agrarökosystemen und deren Umsetzung im Bereich des Datenmanagements sowie Untersuchungen zu ökologischen und ökonomischen Wirkungen von PA im Mittelpunkt.

In Deutschland sind zahlreiche Hochschulen und private Unternehmen in der Forschung zu PA engagiert; mehrere erfolgreiche Verbundprojekte wurden in den vergangenen Jahren durchgeführt und einige neue Projekte befinden sich in der Startphase (z. B. das BMBF-Verbundprojekt preagro II und PIROL der Volkswagenstiftung). Gleichwohl besteht noch erheblicher Forschungsbedarf in verschiedenen Bereichen, insbesondere bei der Entwicklung der Sensortechnik zur raschen und kostengünstigen Erfassung von Boden- bzw. Pflanzenparametern und pflanzenbaulicher Prinzipien und Modelle zur Unterstützung der Entscheidungsfindung sowie in der Erstellung standort- und bestandsspezifischer Applikationskarten. Auch auf europäischer Ebene wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Projekte zu PA gefördert. Außerhalb Europas wird PA-Forschung mit unterschiedlichen nationalen Schwerpunkten betrieben. Während in den USA die Reduzierung des Einsatzes von Dünger und Pflanzenschutzmitteln im Vordergrund steht, erwartet Japan, dass PA einen Beitrag zur Behebung der strukturbedingten Probleme seiner Landwirtschaft leisten wird.

IV. Ökonomische Aspekte von Precision Agriculture

Die Attraktivität und Verbreitung von PA wird maßgeblich durch ihre Wirtschaftlichkeit[4] auf Betriebsebene bestimmt. Bei der Erstellung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse werden i. d. R. lediglich solche Kosten- und Nutzenpositionen berücksichtigt, deren Quantifizierung vergleichsweise einfach bzw. problemlos möglich ist. Dies sind auf der einen Seite Anschaffungs- und Betriebskosten für PA und auf der anderen Seite Betriebsmitteleinsparungen oder Mehrerträge. Daneben treten jedoch sowohl auf der Kosten- als auch auf der Nutzenseite schwer bzw. nicht quantifizierbare Positionen auf. So könnten durch die Anwendung von PA zusätzliche positive Effekte beispielsweise durch Arbeitsentlastungen infolge der Automatisierung von Arbeitsprozessen oder bessere Vermarktungschancen durch eine hohe Transparenz bei der Produktion erreicht werden. Weitere wirtschaftliche Vorteile für den landwirtschaftlichen Unternehmer könnten sich durch eine höhere Entscheidungssicherheit aufgrund einer besseren Informationsbasis und allgemein bessere Voraussetzun-gen zur Optimierung des betrieblichen bzw. produktionsorientierten Managements ergeben (Werner/Christen 2004, S. 142). Auf der anderen Seite wird bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit von PA-Verfahren häufig nicht berücksichtigt, dass diese neben den Kosten für die Anschaffung und Wartung der Techniken zusätzlich zeit- und kostenaufwendige Einarbeitungsphasen und Schulungen u. ä. für Betriebsleiter und Mitarbeiter mit sich bringen. Insgesamt dürfte der Zeitbedarf im Management erheblich höher liegen als der Aufwand beim Management von Betrieben des integrierten (Schlagkarteiführung, Prozessdokumentation u. a.) oder auch ökologischen Landbaus (Auditierungsaufwand) (Werner/Christen 2004, S. 141 f.).

Die vorliegenden Untersuchungen zu den ökonomischen Wirkungen von PA sind zudem dadurch gekennzeichnet, dass sie i. d. R. nur einzelne Techniken und Verfahren von PA im Anbau einzelner Kulturarten betrachten. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Integration verschiedener PA-Verfahren aufgrund von Synergieeffekten wirtschaftlich günstiger ist als die Anwendung von Einzelverfahren: Durch Mehrfachnutzung von Daten und Geräten sowie produktionsorientiertem Know-how über die Kulturarten und Verfahren hinweg könnten im Betrieb die Kosten der PA-Techniken verringert werden (Werner/ Christen 2004, S. 138 f.). Darüber hinaus sind in den verfügbaren Wirtschaftlichkeitberechnungen zu PA zumeist keine vollständigen Angaben zu den zugrunde gelegten Annahmen, den eingesetzten Techniken, Kosten, Betriebsmitteleinsparungen oder Mehrerträgen enthalten. Hinzu kommt, dass für die Ergebnisse der betreffenden Untersuchungen die spezifischen Bedingungen vor Ort – etwa die Beschaffenheit der Flächen oder das regionale Klima und die im Untersuchungszeitraum herrschende Witterung – von entscheidender Bedeutung sind. Eine Übertragung oder Verallgemeinerung solcher Ergebnisse ist daher nur unter Vorbehalten möglich.

In diesem Kapitel werden zunächst die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von PA dargestellt. Daraufhin werden für verschiedene teilflächenspezifische Maßnahmen die hierdurch erzielbaren Betriebsmitteleinsparungen oder Mehrerträge aufgeführt. Der Schwerpunkt der anschließenden Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Betriebsebene besteht darin, auf Grundlage der verfügbaren Informationen exemplarische Modellrechnungen aufzustellen, die insbesondere Aufschluss darüber geben sollen, ab welcher Betriebsgröße bestimmte PA-Anwendungen unter Annahme plausibler Werte für Kosten- und Nutzenpositionen wirtschaftlich wären. Abschließend wird die Frage nach der Akzeptanz von PA in der Landwirtschaft behandelt.

[4] Dieses Kapitel basiert zum Teil auf dem Gutachten von Strecker et al. (2004a).

1. Einflussfaktoren auf Wirtschaftlichkeit

Sowohl die Höhe der potenziellen Betriebsmitteleinsparungen oder Mehrerträge als auch die der spezifischen Kosten von PA-Anwendungen hängen von zahlreichen Faktoren ab. Hierzu gehören zum einen das gewählte PA-Verfahren, dessen Auslastung und Integration im Betrieb bzw. die Organisation des PA-Einsatzes.

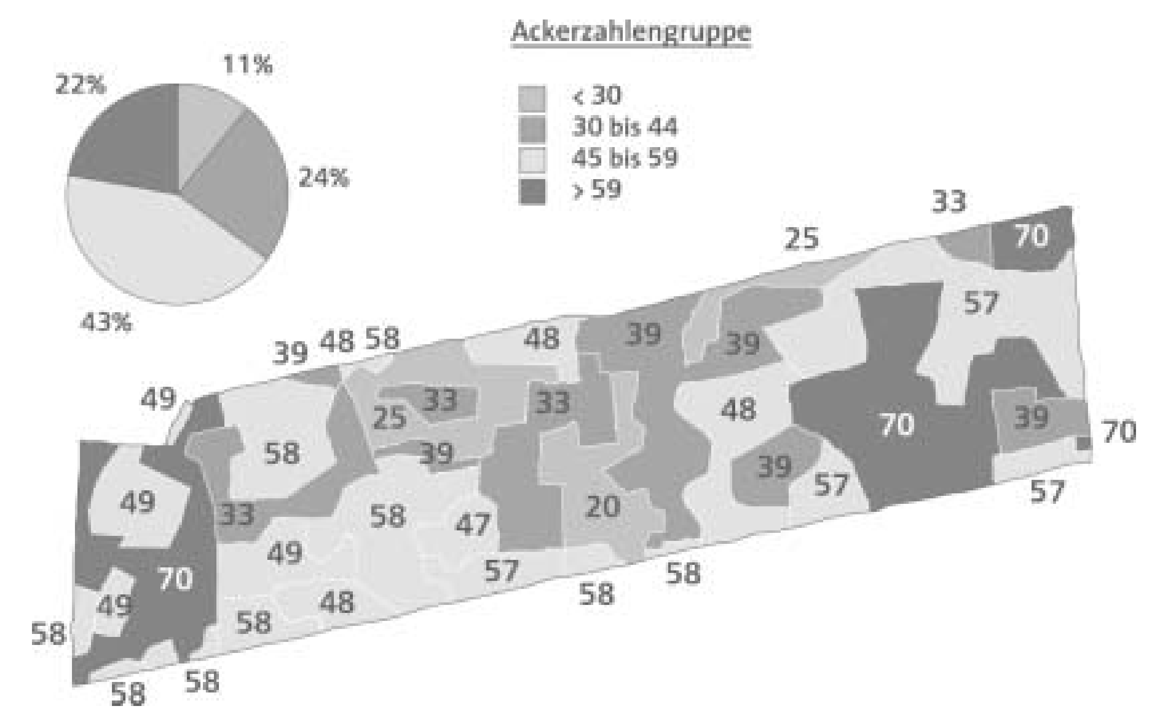
Von herausragender Bedeutung unter den Einflussfaktoren ist die Heterogenität des zu bewirtschaftenden Feldes: je höher die Standortheterogenität, desto eher ist mit relevanten Betriebsmitteleinsparungen oder Ertragssteigerungen und somit mit der Rentabilität von PA zu rechnen. Die Plausibilität dieser Annahme wurde von Dabbert/Kilian (2002) gestützt: Sie konnten am Beispiel der Stickstoffdüngung von Weizen und Mais zeigen, dass der Variationskoeffizient des Ertrags – ein Maß für die Standortheterogenität – positiv mit der Steigerung des Deckungsbeitrags korreliert. Derzeit existieren jedoch noch keine Vorgaben für eine Klassifizierung der Ackerflächen nach der Bodenheterogenität (Schmerler et al. 2001, S. 62). Funke (2000, nach Schmerler et al. 2001, S. 62) schlägt vor, Teilflächen nach vier Ackerzahlengruppen (< 30, 30 bis 44, 45 bis 59, > 59) zu ordnen. Abbildung 8 zeigt, wie groß die Heterogenität des Bodens auf einem Feld sein kann. Die niedrigste Heterogenitätsstufe 1 erhält hierbei z. B. ein Feld, dessen Fläche zu 90 Prozent und mehr einer Ackerzahlengruppe und zu höchstens 10 Prozent einer weiteren Gruppe zugeordnet werden kann. Derzeit liegt keine umfassende Untersuchung darüber vor, mit welchen Anteilen die gesamte Ackerfläche Deutschlands den jeweiligen Heterogenitätsstufen zugeordnet werden könnte und inwieweit die bestehenden Feldgrenzen diesen Heterogenitäten angepasst sind.

Ein zweiter Einflussfaktor von großer Bedeutung auf die Wirtschaftlichkeit von PA-Techniken ist die Bewirtschaftungsintensität. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei Betrieben, die mit einem relativ hohen Aufwand an Dünge- und Pflanzenschutzmitteln produzieren, PA-Verfahren eher wirtschaftlich sind, da hier das Einsparpotenzial an Betriebsmitteln grundsätzlich höher ist als bei Betrieben mit niedriger Produktionsintensität.

Ein dritter wichtiger Einflussfaktor für die Rentabilität von PA ist die Größe des Betriebs bzw. der Flächen, auf denen teilflächenspezifische Maßnahmen durchgeführt werden. Bei einer Zunahme der mit PA bewirtschafteten Fläche sinken die Kosten des Verfahrens je Flächeneinheit, da die fixen Kosten – etwa für die Anschaffung der PA-Technik – auf eine größere Fläche verteilt werden können. Die variablen Kosten von PA bleiben dagegen konstant bzw. können, wie z. B. bei der Bodenbeprobung, proportional zur Fläche ansteigen. Zudem muss berücksichtigt werden, dass die betreffenden Maschinen i. d. R. eine Kapazitätsgrenze aufweisen, so dass ab einem Flächenumfang Investitionen in zusätzliche Anschaffungen nötig sind. Für kleinere Betriebe kann der Einsatz von PA ebenfalls rentabel werden, wenn sie diese nicht selbst an-

Abbildung 8

Beispielhafte Darstellung der Bodenheterogenität eines Feldes auf der Grundlage von Ackerzahlen



Anmerkung: Spannweite der Ackerzahlen von 17 bis 100, Feldgröße: 73 ha
Quelle: Ehlert et al. 2004, S. 20

schaffen, sondern Dienstleister (z. B. Lohnunternehmer) mit der Durchführung von bestimmten PA-Maßnahmen beauftragen.

Die Kosten, die einem bestimmten PA-Verfahren zugeschrieben werden können, lassen sich durch Mehrfachnutzungen von Daten und Technik reduzieren. So können einmal erhobene bzw. erworbene Daten (z. B. digitale Bodenkarten) als Basis für verschiedene teilflächenspezifische Anwendungen verwendet werden (Bodenbearbeitung, Stickstoffdüngung u. a.) ebenso wie satellitengesützte Ortungssysteme, die sowohl bei der Datenerfassung (Ertragskartierung) als auch bei verschiedenen Offline- oder kombinierten Ansätzen benötigt werden. Insgesamt ist deshalb davon auszugehen, dass bei einer zunehmenden Integration verschiedener PA-Anwendungen die Wirtschaftlichkeit von PA auf Betriebsebene steigt.

Schließlich entscheiden noch weitere Faktoren, die sich nicht aus den Merkmalen des jeweiligen landwirtschaftlichen Feldes oder Betriebs und den Entscheidungen des Betriebsleiters ergeben, über die Wirtschaftlichkeit von PA. In diesem Zusammenhang sind v. a. die Preise für die Datenerfassung, Kosten für die Anschaffung von PA sowie die Kosten für die Betriebsmittel und die auf dem Markt erzielbaren Preise für landwirtschaftliche Produkte zu nennen.

2. Kosten

Die Anwendung von PA ist für den landwirtschaftlichen Betrieb zunächst mit Kosten verbunden. Dabei lassen sich grundsätzlich drei Kostenkategorien unterscheiden:

– Datenerfassung (z. B. Karten, GPS für Ertragskartierung, Sensoren),

– Datenmanagement- und Beratungssysteme (Hard- u. Software),

– Applikations- und Navigationstechnik (GPS, gezielt ansteuerbare Geräte zur Ausbringung von Dünger oder Pflanzenschutzmitteln u. a.).

Ein Teil der Kosten fällt für einen längeren Planungszeitraum (ca. fünf bis zehn Jahre) einmalig an, etwa die Anschaffungskosten für Bodenkarten, ein GPS-Empfangsgerät oder geeignete Düngerstreuer. Andere Kosten, z. B. für Bodenbeprobungen oder GPS-Referenzsignale, entstehen regelmäßig. Hierzu zählen auch Aufwendungen für Reparaturen und Instandhaltung der Geräte und Maschinen, für die Pflege des Datenbestands sowie für Schulungen und Einweisungen des Personals zur Handhabung der Systeme.

2.1 Kosten der Datenerfassung

Datenerfassung bei Offlineverfahren

Eine wichtige Datenquelle für Offlineverfahren stellen Bodenkarten dar. Karten auf Grundlage der Bodenschätzung liegen in vielen Betrieben bereits vor. Ansonsten können sie über die regional zuständigen Behörden (u. a. Oberfinanzdirektionen, ggf. Katasterämter) bezogen werden. Bislang sind überwiegend analoge Fassungen der Karten verfügbar; allerdings wird die Digitalisierung in den Bundesländern derzeit sukzessive vorgenommen. Die Kosten für eine Flurkarte mit den Ergebnissen der Bodenschätzung bemessen sich nach der Vermessungsgebührenordnung und können zwischen den abgebenden Einrichtungen variieren. Einige bieten die Karten inzwischen auch über das Internet an. Die Kosten pro ha bewegen sich etwa im Bereich von 3 bis 10 Euro und nehmen für größere Karten ab.[5] Da die Anschaffung einer Bodenkarte einmalig ist, sind die Kosten als verhältnismäßig gering einzustufen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Karten auf Grundlage der Bodenschätzung nur unter den in Kapitel II.4 genannten Einschränkungen, d. h. insbesondere unter Zuhilfenahme weiterer Datenquellen, zu verwenden sind.

Luft- und Satellitenaufnahmen liefern flächendeckende Fernerkundungsdaten für große Areale (z. B. 180×180 km² bei Landsat). Sie können von privaten Dienstleistern bezogen werden. Hochauflösende Satellitenbilder sind nach Lettner et al. (2001, S. 112) zu Preisen von 4 bis 12 Euro/km² erhältlich. Da Fernerkundungsdaten je nach Datenquelle (Luft- oder Satellitenbildaufnahmen, verschiedene abgedeckte Spektralbereiche) sehr unterschiedliche Qualitäten aufweisen und somit unterschiedliche Behandlungen für die Nutzbarmachung der Daten erfordern, ist ein Vergleich der Kosten für die „Rohdaten“ nur bedingt sinnvoll. Verschiedene Hersteller bieten meist nicht nur Rohdaten, sondern Pakete mit entsprechenden Datenauswertungen an: So umfasst z. B. das Startpaket „LORIS® Maps“ von der Firma KEMIRA GrowHow neben Infrarot-Luftbildern weitere Dienstleistungen wie beispielsweise die Erstellung einer Karte der Biomasseverteilung auf Grundlage des Infrarot-Luftbildes sowie eine Düngungsempfehlung. Die Kosten belaufen sich im Paketangebot für 50 ha auf 8 Euro/ha.

Karten, die nicht auf historischen Daten beruhen, sondern relevante Boden- und Pflanzenparameter relativ zeitnah vor Durchführung der Bewirtschaftungsmaßnahme darstellen, können von den Landwirten selbst oder durch Dienstleistungsunternehmen erstellt werden. Voraussetzung hierfür ist ein satellitengestütztes Positionierungssystem, das eine Kartierung der relevanten Parameter mit hinreichender Genauigkeit erlaubt. Die in diesem Zusammenhang entstehenden Kosten – v. a. für die Anschaffung des GPS-Empfangsgeräts sowie für einen Referenzsignaldienst – werden in Kapitel IV.2.3 detaillierter dargestellt.

Eine manuelle Aufnahme der Daten – etwa im Zuge einer Unkrautkartierung – ist mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden: So rechnen Lettner et al. (2001, S. 123 f.) bei der manuellen Unkrautbonitur je nach Größe des Aufnahmerasters und dem Grad der Verunkrautung mit einem Zeitbedarf von einer bis fünf Arbeitskraftstunden/ha, was bei einem Lohnansatz von 10 Euro/Stunde zu Kosten in Höhe von 10 bis 50 Euro/ha führt. Dabei ist vor jeder teilflächenspezifischen Applika-

[5] Für einen Kartenausschnitt im Format DIN A4 (entspricht 1,5 ha) sind in Bonn 13,75 Euro und in Meldorf 12 Euro zu entrichten; bei DIN A1 (entspricht 12 ha) in Bonn 55 Euro, in Meldorf 32 Euro.

tion eine erneute Bonitur des aktuellen Unkrautbestands nötig. Sensoren ermöglichen eine Datenerfassung mit erheblich geringerem Zeitaufwand als manuelle Bonituren. Sie könnten so – trotz ihres z. T. hohen Anschaffungspreises – zu einer Reduktion der Kosten für die Erfassung sich rasch ändernder Parameter führen.

Die Ertragskartierung in Getreide während der Ernte ist ein sensorbasiertes PA-Verfahren mit relativ weiter Verbreitung. Der Preis für die verwendeten Korndurchsatzsensoren beläuft sich z. B. im Falle der Quantimetertechnik der Firma Claas auf rund 4 900 Euro. Die Ertragskartierung soll Hinweise auf die Produktivitätsunterschiede innerhalb des Feldes geben und auf dieser Basis eine Optimierung der Bewirtschaftungsmaßnahmen ermöglichen. Die Ertragskartierung kann auch als Dienstleistung bezogen werden; der Preisaufschlag gegenüber den reinen Erntekosten beträgt rund 10 Euro/ha.

Die Messung und Kartierung der elektrischen Bodenleitfähigkeit als Indikator für die Nährstoffversorgung des Bodens kann im Prinzip ebenfalls vom Landwirt selbst durchgeführt werden, wird aber aufgrund der erforderlichen Kalibrierung meist von Dienstleistern übernommen. Sensoren zur Messung von Bodennährstoffen gibt es von verschiedenen Herstellern (z. B. Veris, Mucep, Soil Doctor® oder GEM 300). Das Gerät „EM38“ der Firma Geonics Limited ist in Deutschland am weitesten verbreitet. Es ist zu einem Preis ab rund 8 900 Euro erhältlich. Je nach Betriebsgröße und Häufigkeit der Verwendung ergeben sich aus den Anschaffungskosten für die Sensortechnik unterschiedliche Kosten für die Kartierung des betreffenden Parameters. Die Messung der elektrischen Bodenleitfähigkeit ist als Dienstleistung für 6 bis 8 Euro/ha zu beziehen (KTBL 2004).

Auch die Erstellung von Karten zum Gehalt an Grundnährstoffen im Boden erfolgt bei Bedarf unter Verwendung eines satellitengestützten Positionierungssystems zur Verortung der Bodenproben und der daraus erhobenen Daten. Diese positionsgenaue Nährstoffkartierung kann vom Landwirt mit geeigneten GPS-Geräten selber durchgeführt werden, erfolgt aber im Allgemeinen als Dienstleistung. Die Bodenproben werden derzeit noch im Labor analysiert. Die Kosten für die Beprobung im 5-ha-Raster mit Analyse der Nährstoffe Phosphat, Kalium und Magnesium sowie des pH-Werts einschließlich Kartendarstellung belaufen sich – je nach Anbieter – auf etwa 10 bis 15 Euro/ha; im 1-ha-Raster fallen höhere Kosten an. Da die Grunddüngung nicht jährlich, sondern meist im Abstand von einigen Jahren durchgeführt wird (max. sechs Jahre Abstand), ist die Erstellung von Nährstoffkarten als Grundlage für die teilflächenspezifische Düngung zwar ebenfalls nicht im jährlichen Turnus nötig. Dennoch sind – gerade bei einer geringen Rastergröße – die für den Betrieb anfallenden Kosten erheblich.

Datenerfassung bei Onlineverfahren

Bei Onlineverfahren kommen verschiedene Sensoren zum Einsatz, die eine sofortige Umsetzung des gemessenen Parameters in eine differenzierte Bewirtschaftung ermöglichen. Stickstoffsensoren, die durch spektrale Messung des vom Pflanzenbestand reflektierten Lichts die Stickstoffversorgung und den Stickstoffbedarf der Pflanzen ermitteln, werden von verschiedenen Herstellern angeboten. Die Kosten beispielsweise für den Yara N-Sensor® belaufen sich auf rund 21 400 Euro bei einer Tagesleistung von 150 ha. Für Upgrades zur Integration neuer pflanzenbaulicher Erkenntnisse fallen zusätzliche Kosten von etwa 450 Euro/Jahr an (http://www.agricon.de, Juli 2005). Die Verwendung des Sensors kann bei der Firma Agri Con auch als Dienstleistung bezogen werden; die Kosten belaufen sich einschließlich der entsprechenden Applikationstechnik auf 14 Euro/ha. Optoelektronische Unkrautsensoren (z. B. Detectspray®, Weedseeker®) werden ebenfalls von verschiedenen Herstellern angeboten. Das System Detectspray® kostet für den Einsatz in der Landwirtschaft rund 14 000 Euro. Der CROP-Meter, der für eine teilflächenspezifische Ausbringung von Stickstoffdünger und bestimmten Pflanzenschutzmitteln verwendet werden kann, ist zu einem Preis von rund 5 800 Euro erhältlich. Wie bei den o. g. Sensoren zum Einsatz in Offlineverfahren variieren auch bei den hier genannten Sensoren die Kosten/ha je nach Betriebsgröße und Verwendungshäufigkeit.

2.2 Kosten von Datenmanagement- und Beratungssystemen

Datenmanagement bei Offlineverfahren

Die Datenverwaltung, -analyse und -interpretation bis hin zur Erstellung von Applikationskarten geschieht mit Hilfe bestimmter Computerprogramme. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass z. T. große Mengen raumbezogener Daten mit geeigneten Algorithmen bearbeitet werden können. Häufig wird die für eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung erforderliche Software als Bestandteil von Angebotspaketen zusammen mit der entsprechenden Sensor- bzw. Applikationstechnik vertrieben. Generell unterscheiden sich die verschiedenen Angebote hinsichtlich der Funktionalitäten, die für die Analyse und Interpretation der Daten zur Verfügung stehen. Entsprechend variieren auch die Preise der angebotenen Software. So belaufen sich beispielsweise die Kosten für das Programm „AGRO-MAP“ des Anbieters AGROCOM für die Erstellung von Ertragskarten für einen Betrieb mit 100 ha Fläche auf rund 350 Euro. Geoinformationssyteme mit einem weiteren Leistungsumfang werden zu Preisen zwischen 600 und 2 000 Euro einschließlich einer Lizenz für 1.000 ha angeboten; für eine unbegrenzte Lizenz belaufen sich die Kosten auf bis zu 2 600 Euro. Zusätzlich fallen in den meisten Fällen jährliche Supportkosten an, die 10 bis 20 Prozent des Anschaffungspreises für die Software betragen können (http://www.tbv-erfurt.de, Juli 2005). Bei der Anschaffung muss im Einzelfall geprüft werden, welche Anforderungen das Programm zu erfüllen hat. Dabei sind auch allgemeine Anforderungen zu berücksichtigen, z. B. dass eine künftige Integration weiterer PA-Anwendungen möglich sein sollte.

Datenmanagement bei Onlineverfahren

Onlineverfahren erfordern einen geringeren Managementaufwand für Daten als Offlineverfahren, da die Georeferenzierung, Speicherung und Auswertung der erfassten Daten zur Steuerung der teilflächenspezifischen Applikation grundsätzlich nicht erforderlich ist. Allerdings genügt die sensorgestützte Datenerfassung allein nicht für eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung. Vielmehr muss – ausgehend von den erhobenen Daten – auf die Ausprägung der Bewirtschaftungsmaßnahme geschlossen werden (z. B. Applikationsmenge des Stickstoffdüngers). Dies geschieht mit Hilfe von Computerprogrammen, die i. d. R. bei Angeboten für Sensor- bzw. Applikationstechnik bereits enthalten sind. Die gesonderte Auflistung von Kosten für das Datenmanagement bei Onlineverfahren ist daher nur bedingt sinnvoll. Falls jedoch eine georeferenzierte Erfassung der Sensordaten erfolgen soll – etwa als Datengrundlage für kombinierte Online-/Offlineanwendungen oder aber zu Dokumentationszwecken –, muss auf o. g. Geoinformationssysteme bzw. Beratungs- und Entscheidungsunterstützungssysteme zurückgegriffen werden. Onlineverfahren sind zurzeit vorrangig für die Stickstoffdüngung verfügbar. Für weitere pflanzenbauliche Maßnahmen (z. B. Ausbringung von Pflanzenschutzmittel) werden in den nächsten Jahren voraussichtlich ebenfalls in Echtzeit arbeitende Sensorsysteme angeboten.

Hardware

Bei der Planung und Durchführung von PA-Maßnahmen werden große Datenmengen erzeugt und bearbeitet. Die hierfür erforderliche Hardware besteht im Wesentlichen aus einem büroüblichen, leistungsstarken Betriebsrechner[6], dem Bordcomputer auf dem Traktor bzw. Selbstfahrer sowie so genannten Jobrechnern auf den jeweiligen Geräten. Bordcomputer gehören bei den meisten Landmaschinenherstellern zur Serienausstattung und Jobrechner werden inzwischen meist beim Kauf von Neugeräten als Zusatzausstattung – und zukünftig vermutlich standardmäßig – angeboten.

2.3 Kosten der Applikations- und Navigationstechnik

Globales Positionierungssystem

Ein satellitengestütztes Positionierungssystem ist Voraussetzung für die Durchführung teilflächenspezifischer Maßnahmen auf Basis von Applikationskarten (Offlineverfahren oder mit Onlinesystemen kombinierte Offlineverfahren). Zudem wird es für einen wichtigen Teil der Datenerfassung im Rahmen von Offlineverfahren benötigt (z. B. Ertragskartierung). Die Kosten für ein Positionierungssystem setzen sich zusammen aus den Kosten für ein Empfangsgerät für die Ortungssignale der Satelliten sowie – falls eine höhere Ortungsgenauigkeit verlangt ist – einen Dienst, der Korrektursignale für die satellitengestützte Ortung anbietet. Einfache GPS-Empfänger sind bereits zu einem Preis ab 250 Euro erhältlich. Allerdings bieten Geräte mit höherem Preis i. d. R. eine höhere Genauigkeit bei der Positionsbestimmung, weshalb für die landwirtschaftliche Nutzung empfohlene GPS-Geräte zwischen 1 000 und 8 000 Euro kosten.

Auch bei den Korrektursignalen gibt es große Unterschiede hinsichtlich der Genauigkeit der Positionierung. Hier gilt ebenfalls, dass eine höhere Genauigkeit höhere Kosten für den Signaldienst mit sich bringt. Für die meisten heute verfügbaren PA-Anwendungen ist eine Genauigkeit in der Größenordnung von einem Meter ausreichend. Lediglich satellitengestützte automatische Lenksysteme lassen sich nur auf Grundlage wesentlich höherer Genauigkeiten im Zentimeterbereich durchführen. Grundsätzlich ist jedoch davon auszugehen, dass höhere Genauigkeiten bei allen satellitengestützten Anwendungen zu besseren Ergebnissen führen.

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die in Deutschland verfügbaren Korrektursignale mit ihren Genauigkeiten und Kosten. Der Echtzeit-Positionierungs-Service (EPS) des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung (SA*POS*®) stellt ein relativ kostengünstiges Angebot für Korrektursignale dar, da die Lizenzgebühren lediglich einmalig beim Kauf des Decoders zu entrichten sind. GPS-Korrekturdaten mit einer Positionsgenauigkeit von etwa einem Meter und ebenfalls geringen Lizenz-kosten liefert der Korrektursignaldienst ALF (Accurate Positioning by Low Frequency) der Deutschen Telekom. Die maximale Reichweite des in Mainflingen bei Frankfurt installierten Langwellensenders beträgt allerdings nur rund 600 km. Eine interessante Alternative zu diesen kommerziellen Angeboten stellt der kostenfreie Korrekturdatenservice für die Schifffahrt (Beacon-Küstenfunk) dar, der nach Abschluss des Probebetriebs ganz Deutschland abdecken soll.

Auch der Europäische Geostationäre Navigationsüberlagerungsdienst (European Geostationary Navigation Overlay Service, EGNOS), ein gemeinsames Projekt der Europäischen Raumfahrtagentur ESA, der Europäischen Kommission sowie der Europäischen Flugsicherung, wird voraussichtlich ab 2006 europaweit in vollem Betrieb und kostenfrei zu nutzen sein. Besteht Sichtkontakt zu den Satelliten kann mit diesen Korrekturinformationen eine Positionsgenauigkeit von 0,20 bis 2 m erreicht werden. Für die satellitengestützten Korrekturdatendienste von OmniSTAR® fallen neben den Decoderkosten von rund 2 500 Euro noch Lizenzgebühren in Höhe von 500 bis 800 Euro jährlich an.

Navigationstechnik

Die satellitengestützte Ortung kann in verschiedenen Formen zur Unterstützung des Landwirts bei der Fahrzeugsteuerung auf dem Acker genutzt werden. Satellitengestützte Spurführungssysteme erfordern i. d. R. Korrektursignale mit einer Genauigkeit im Zentimeter- oder Dezimeterbereich, wie sie von den Signaldiensten OmniSTAR® und EGNOS abgestrahlt bzw. von einer eigenen Referenzstation geliefert werden (Klee/Hofmann 2005, S. 18). In Tabelle 7 sind einige DGPS-gestützte Autopilotsysteme sowie Referenzsignalkosten aufgeführt.

6 Sofern eine Neuanschaffung notwendig ist, genügt die Leistungsfähigkeit aktueller Computer meist den Anforderungen. Die Kosten variieren je nach Ausstattung und Anbieter, bewegen sich aber etwa im Bereich von 1 000 Euro.

Tabelle 6

Kosten für Korrektursignale mit Genauigkeiten im Meterbereich

Korrektursignaldienst	Decoderkosten	Lizenzkosten	Genauigkeit	Bemerkungen
Eigenanlage (Funk)	ab 10.000 Euro	–	bis zu 1 cm, je nach Basislänge	Reichweite max. 5 bis 30 km je nach Sendeleistung (Sichtweite)
Beacon-Küstenfunk (Mittelwelle)	ab 800 Euro	–	1 bis 5 m	derzeit im Probebetrieb, künftig deutschlandweit
ALF-Dienst (Langwelle)	ab 700 Euro	125 Euro für 10 Jahre	bis in Submeterbereich	Reichweite 600 km Radius um Mainflingen, Langwelle zuverlässig im Empfang
SA*POS*®-EPS (UKW)	ab 800 Euro inkl. Lizenz	–	0,50 bis 3 m	deutschlandweit verfügbar
OmniSTAR® (wide area)	2.500 Euro	500 bis 800 Euro/Jahr	20 bis 70 cm	weltweit verfügbar, hohe Empfangssicherheit
EGNOS (wide area)	in best. GPS-Empfängern integriert	–	0,20 bis 2 m, abhg. von Satellitenzahl	ab Anfang 2006 europaweit verfügbar

Quelle: Demmel 2004, S. 22; Griffin 2004; KTBL 2002; http://www.esa.int (Juli 2005); http://www.sapos.de (Juli 2005)

Tabelle 7

Kenngrößen für DGPS-gestützte automatische Traktorlenkungen

DGPS-Anbieter	Hersteller	Lenksystem	Genauigkeit	Preis	Referenzsignalkosten/Jahr
EGNOS/ OmniSTAR®	AGCO/ BEELINE Technologies	Auto-Guide	+/–25 cm +/–5 bis 20 cm	15.000–24.400 Euro je nach Präzision und Typeneignung	kostenlos; 840–2.000 Euro
StarFire SF 2	John Deere	Auto Trac II	+/–5 cm	19.100–24.400 Euro	1.000 Euro
OmniSTAR®	geo-Konzept/ Trimble	AgGPS-Autopilot	+/–10 bis 30 cm	17.400–23.200 Euro	800–1.800 Euro

Quelle: nach Klee/Hofmann 2005, S. 18, geändert

Der Parallelfahrassistent „OUTBACK S“ der Firma AGROCOM berechnet die Fahrtposition einige Sekunden im Voraus und gibt eine Lenkempfehlung an den Fahrer (Kap. III.6). Das Gerät ist für rund 6 500 Euro erhältlich und kann zu einem Autopilotsystem („E-DRIVE“) aufgerüstet werden, welches die Fahrzeugsteuerung über eine Hydraulik selbsttätig vornimmt. Hierzu werden zusätzlich eine Steuerungseinheit sowie ein Lenkventil benötigt, welche von einer autorisierten Werkstatt installiert werden müssen (http://www.agrocom.com, Juli 2005). Der Preis für diese Aufrüstung beläuft sich auf rund 7 000 Euro.

Applikationstechnik

Zur teilflächenspezifischen Ausbringung von Saatgut, Dünger und Pflanzenschutzmitteln im Offlineansatz sind neben einem Positionierungssystem auch geeignete Aus-

bringvorrichtungen nötig, die eine hinreichend genaue Dosierung der Betriebsmittel gestatten. Entsprechende Applikationstechnik wird auch für Onlineanwendungen – etwa in den Bereichen Stickstoffdüngung oder Pflanzenschutz – benötigt.

Pneumatische Drillmaschinen für eine teilflächenspezifische Anpassung der Saatstärke sind von verschiedenen Herstellern verfügbar. Für die differenzierte Saatgutausbringung bietet z. B. die Firma Lemken eine entsprechende Sämaschine mit einer GPS-tauglichen elektronischen Steuerung zu einem Aufpreis von rund 850 Euro an. Die Kosten für eine Nachrüstung belaufen sich dagegen auf rund 4 000 Euro. Bei der Aussaat muss die Drillmaschine zusätzlich mit Füllstandssensor, Saatmengenverstellung und hydraulischem Antrieb der Säwelle ausgestattet sein sowie eine optische Überwachung der Säaggregate ermöglichen.

Im Bereich der Düngung stattet z. B. die Firma Rauch bestimmte Baureihen von Düngerstreuern mit Jobrechnern aus, die von ISOBUS-fähigen Terminals angesteuert werden können und somit für PA tauglich sind. Der Aufpreis für diese Steuerungseinheiten für den Düngerstreuer und die Jobrechner beträgt rund 2 700 Euro.

Für die differenzierte Applikation von Pflanzenschutzmitteln bietet z. B. der Hersteller Dammann Feldspritzen mit ISOBUS-gesteuerten Jobrechnern zu einem Aufpreis von 4 600 bis 5 800 Euro an. Die Firma Amazone bietet für Neumaschinen die Steuerungseinheit Amatron Plus als Jobrechner für rund 1 500 Euro an, die sowohl für die Aussaat als auch für Ausbringung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln geeignet ist. Allerdings muss die Maschine z. B. für die Düngung zusätzlich mit einem Elektromotor ausgestattet sein, der das Steuerventil bedient.

2.4 Beispielhafte Investitionskosten für konkrete Anwendungen

Im Folgenden werden exemplarisch die Anschaffungskosten zur Durchführung teilflächenspezifischer Bewirtschaftungsmaßnahmen dargestellt (Tab. 8). Als Beispiele dienen die Grunddüngung im Offlineverfahren, die Onlinestickstoffdüngung mit dem Yara N-Sensor®, die Applikation von Herbiziden auf Basis optoelektronischer Sensordaten sowie die Verwendung des CROP-Meters zur differenzierten Wachstumsreglerapplikation. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Kosten je nach Wahl der Ausrüstung und Anbieter variieren können.

Die teilflächenspezifische Grunddüngung geschieht im Beispielsfall unter Verwendung eines Amazone-Streuers mit der Steuerungseinheit Amatron Plus sowie der Software AGRO-MAP. Hierfür fallen insgesamt Investitionskosten von rund 1.800 Euro an. Weitere Kosten fallen an durch Nährstoffkartierungen (15 Euro/ha alle fünf Jahre) sowie Ertragskartierungen (10 Euro/ha bei Durchführung durch einen Dienstleister), die als Grundlage zur Erstellung von Applikationskarten dienen. Diese zusätzlichen Kosten summieren sich auf 13 Euro/ha/Jahr. Für die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung wird die Anwendung des Yara N-Sensors® in Verbindung mit einem Rauch-Düngerstreuer angenommen. Zusammen mit Aufwendungen für den Jobcomputer und Elektromotor am Streuer fallen Investitionskosten von rund 26 000 Euro an. Weiter wird angenommen, dass zur teilflächenspezifischen Herbizidbehandlung der optoelektronische Sensor „Detectspray®“ (Investitionskosten von rund 14 000 Euro) eingesetzt wird. Bei der teilflächenspezifischen Wachstumsreglerapplikation wird unterstellt, dass diese unter Verwendung des CROP-Meters in Verbindung mit der Spritztechnik der Firma Dammann (Anschaffungspreis insgesamt: 11 600 Euro) durchgeführt wird.

Tabelle 8

Investitionskosten für beispielhafte PA-Anwendungen

Anwendungsbereich	Kostenpositionen	Anbieter	Kosten
Grunddüngung[1]	Jobrechner Amatron Plus Software AGRO-MAP[2]	Amazone AGROCOM	1.510 Euro 290 Euro
Stickstoffdüngung	N-Sensor (inkl. Jobcomputer) Düngerstreuer (Aufpreis) Elektromotor am Streuer	Yara Rauch	21.400 Euro 2.670 Euro 1.930 Euro
Herbizidapplikation	Detectspray®		14.000 Euro
Wachstumsreglerapplikation	CROP-Meter Spritztechnik	Müller Dammann	5.800 Euro 5.800 Euro

1 Hier ist unterstellt, dass ein geeigneter Düngerstreuer vorhanden ist, der über den Jobrechner zur teilflächenspezifischen Applikation genutzt werden kann. Die Kosten für ein GPS sind nicht enthalten.
2 Die Kosten für AGRO-MAP gelten für einen 100-ha-Betrieb.
Quelle: nach Strecker et al. 2004a, S. 42 ff.

3. Betriebsmitteleinsparungen und Mehrerträge

PA soll durch eine Anpassung der Bewirtschaftungsmaßnahmen an kleinräumige Standort- und Bestandsunterschiede aufgrund von Einsparungen beim Betriebsmitteleinsatz oder höheren Erträgen einen ökonomischen Vorteil gegenüber flächeneinheitlicher Bewirtschaftung mit sich bringen. Dies ist auf zwei Teileffekte zurückzuführen: Zum einen werden bei einer einheitlichen Bewirtschaftung von Ackerflächen meist mehr Betriebsmittel aufgewendet, als dies für Teile der Fläche nötig ist, etwa durch eine Herbizidapplikation in Bereichen, die nur wenig oder gar keinen Unkrautbewuchs aufweisen. In diesen Fällen können PA-Verfahren zu Betriebsmitteleinsparungen bei gleich bleibenden Erträgen und damit zur Verringerung der Kosten führen. Auf der anderen Seite kann die flächeneinheitliche Bewirtschaftung dazu führen, dass das Ertragspotenzial des Standorts wegen einer auf Teilflächen nicht optimalen Produktionsweise nicht voll ausgeschöpft wird. Hier soll PA durch einen auf das optimale Niveau angepassten Betriebsmitteleinsatz zu Mehrerträgen und damit zu Mehreinnahmen führen. Unter Praxisbedingungen greifen beide Teileffekte teilweise ineinander, so dass – je nach den spezifischen Bedingungen – eine Kombination aus verringertem Betriebsmitteleinsatz und gesteigerten Erträgen zu erwarten ist.

Im Folgenden werden die in empirischen Untersuchungen ermittelten Effekte verschiedener PA-Verfahren auf Betriebsmitteleinsparungen oder Mehrerträge dargestellt. Dabei können nur einzelne Verfahren isoliert betrachtet werden, wenngleich angenommen wird, dass durch Kombination verschiedener Anwendungen – etwa differenzierte Stickstoffdüngung zusammen mit einer teilflächenspezifischen Aussaat – ein größerer ökonomischer Vorteil erzielt werden kann. Die Einzelbetrachtung wird durchgeführt, da zum einen nur eine äußerst geringe Anzahl von Untersuchungen vorliegt, die eine Kombination von PA-Verfahren bei gleicher Fruchtart oder gar in einem ganzen Betrieb zum Gegenstand haben. Zum anderen ist bereits die Verallgemeinerung von Versuchsergebnissen zu einzelnen PA-Anwendungen problematisch.

Teilflächenspezifische Bodenbearbeitung

Der Vorteil einer teilflächenspezifischen Bodenbearbeitung wird in erster Linie in der Einsparung von Dieselkraftstoff gesehen. Der Kraftstoffbedarf bei der Bodenbearbeitung bewegt sich gegenwärtig zwischen 10 und 20 l/ha (KTBL 2004), je nach Maschinenausstattung, Bodenbearbeitungsverfahren (Pflügen, Grubbern) sowie Art und Zustand des zu bearbeitenden Bodens. Dabei ist die Bearbeitungstiefe von entscheidender Bedeutung.

Im BMBF-Verbundprojekt preagro wurde in einem Streifenversuch mit jeweils zwei Messfahrten auf bestimmten Teilflächen eine Reduktion der Bearbeitungstiefe von 20 bis 25 auf 10 cm vorgenommen. Der Kraftstoffbedarf war für die flache Bearbeitung weniger als halb so hoch wie für die tiefe Variante (Sommer/Voßhenrich 2002, S. 241). Außerdem konnte bei reduzierter Bearbeitungstiefe die Arbeitsgeschwindigkeit deutlich erhöht werden. Die teilflächenspezifische Anpassung der Bearbeitungstiefe erwies sich als ertragsneutral.

Eine Einschätzung des Potenzials zur Einsparung von Kraftstoff auf Grundlage der vorliegenden Daten ist problematisch, weil sie sich auf eine äußerst dünne empirische Basis stützen müsste. Zudem kann derzeit nicht abgeschätzt werden, welcher Anteil der Ackerflächen Deutschlands die Kriterien für eine teilflächenspezifische Reduktion der Bodenbearbeitungstiefe erfüllt. Wenn vereinfacht davon ausgegangen wird, dass auf 50 Prozent einer Ackerfläche die flache anstelle der tiefen Bearbeitung angewandt werden könnte, würde sich für diese Ackerfläche ein Einsparpotenzial an Dieselkraftstoff von rund 25 Prozent gegenüber einer flächeneinheitlich tiefen Bodenbearbeitung ergeben.

Teilflächenspezifische Aussaat

Im Bereich der teilflächenspezifischen Aussaat können durch eine Anpassung der Saatstärke prinzipiell Einsparungen bei der Saatgutmenge oder Mehrerträge erzielt werden. Bislang liegt allerdings nur eine geringe Anzahl von Versuchsergebnissen zu teilflächenspezifischer Aussaat von Mais und Winterweizen vor (u. a. Praxisbetrieb in Golzow). Bei Winterweizen konnte auf wenig heterogenen Feldern die Saatgutmenge gegenüber flächeneinheitlicher Bewirtschaftung um 6 bzw. 13 Prozent[7] reduziert werden, ohne dass nachteilige Auswirkungen auf den Ertrag festgestellt wurden (Schmerler et al. 2001, S. 36). Bei Körnermais konnten keine relevanten Effekte auf die Saatgutmenge bzw. den Ertrag beobachtet werden, allerdings handelte es sich dabei um ein Feld mit geringer Bodenheterogenität. Hingegen konnte beim Maisanbau auf heterogenen Flächen die Saatstärke auf weniger fruchtbaren Teilflächen ohne Ertragseinbußen deutlich reduziert werden. Die Erhöhung der Maissaatstärke auf fruchtbaren Teilflächen brachte zusätzliche Ertragssteigerungen bis zu 5 Prozent[8] mit sich. Auch Maidl et al. (2000, S. 125) berichten nach einjährigen Streifenversuchen mit Mais von höheren Erträgen durch die teilflächenspezifische Anpassung der Saatstärke. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse entsprechen somit den Erwartungen hinsichtlich positiver Effekte der teilflächenspezifischen Aussaat. Allerdings sollten sie vor dem Hintergrund der schwachen Datenbasis sowie der generell problematischen Verallgemeinerung entsprechender Versuchsergebnisse eher als Hinweis denn als statistisch signifikante Bestätigung betrachtet werden.

Teilflächenspezifische Grunddüngung und Kalkung

Der Vorteil der teilflächenspezifischen Ausbringung von Grundnährstoffen wird in erster Linie in Einsparungen bei der ausgebrachten Düngermenge gesehen. So ist die

---

[7] 1997 wurden bei differenzierter Aussaat 173 kg gegenüber 198 kg Saatgut/ha bei einheitlicher Saatstärke ausgebracht, 1998 belief sich die Menge auf 190 kg gegenüber 203 kg/ha.

[8] Die Mehrerträge beliefen sich auf bis zu 5 dt/ha bei Erträgen von bis zu 98 dt/ha bei einheitlicher Saatstärke (Schmerler et al. 2001, S. 37 u. 92).

Versorgung des Ackerbodens mit Phosphat und Kalium innerhalb eines Feldes häufig stark variabel. Mit Ertragssteigerungen hingegen wird aufgrund des meist ausreichenden Bodenvorrats an Nährstoffen weniger gerechnet. Allerdings hat eine Studie über den aktuellen Stand der regionalen Phosphatverteilung in Deutschland ergeben, dass die Versorgung landwirtschaftlich genutzter Böden mit Phosphat einer weiteren Optimierung bedarf: lediglich 38 Prozent der Flächen verfügten über eine optimale Phosphatversorgung; 36 Prozent waren dagegen mit Phosphat überversorgt und weitere 26 Prozent unterversorgt[9] (LUFA Rostock 2005).

Der Nachweis von Ertragseffekten durch optimale Grunddüngung ist – wenn überhaupt – nur langfristig möglich und mit größeren Unsicherheiten behaftet (Wenkel et al. 2002, nach Strecker et al. 2004a, S. 18). Die Anzahl der vorliegenden Untersuchungen zu den Effekten einer teilflächenspezifischen Grunddüngung und Kalkung ist eher gering. Während einerseits von Einsparpotenzialen bei der differenzierten Phosphatdüngung berichtet wird (Ostheim 2000), zeigt eine andere Untersuchung keine wesentlichen Unterschiede in der insgesamt ausgebrachten Menge an Phosphat und Kalk im Vergleich zur flächeneinheitlichen Düngung (Weisz et al. 2003). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die ausgebrachte Düngermenge gegenüber der flächeneinheitlichen Düngung zwar auf bestimmten Teilflächen reduziert, auf anderen Teilflächen jedoch erhöht wurde.

Der gleiche Effekt wurde auf einem 80 ha großen Feld bei der zweijährigen Vorratsdüngung mit Phosphat und Kalium beobachtet (Wenkel et al. 2002, nach Strecker et al. 2004a): Hier hätte die einheitliche Ausbringung eine summarische Überdüngung von 312 kg Phosphat und 174 kg Kalium sowie eine lokale Unterversorgung von 368 kg Phosphat und 419 kg Kalium mit sich gebracht. Insgesamt zeigte sich für beide Nährstoffe eine Steigerung der ausgebrachten Düngermenge. In einem anderen Versuch konnte als Folge einer teilflächenspezifischen Kalkung ein signifikanter Anstieg des Sojaertrags nachgewiesen werden; ein Einfluss der Phosphatdüngung auf den Ertrag wurde in diesem Versuch hingegen nicht festgestellt (Weisz et al. 2003).

Für die differenzierte Grunddüngung kann auf Grundlage der vorliegenden Daten kein eindeutiges Fazit gezogen werden. Ertragssteigerungen scheinen eher unwahrscheinlich, können aber nicht ausgeschlossen werden. Bei der ausgebrachten Düngermenge sind neben den erwarteten Reduktionen auch gleich bleibende Mengen bzw. Steigerungen möglich. In diesen Fällen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die kleinräumige Nährstoffversorgung des Bodens näher an dem – in der Modellvorstellung angenommenen – Optimum für die Pflanzenversorgung liegt.

Teilflächenspezifische Stickstoffdüngung

Die Stickstoffversorgung der Pflanzen zählt zu den bedeutendsten Ertragsbestimmenden Faktoren im Ackerbau. Von einer kleinräumig angepassten Stickstoffdüngung werden neben Einsparungen bei der ausgebrachten Düngermenge auch Ertragssteigerungen erwartet. Diese Erwartungen konnten durch Untersuchungen auf Basis von Offlineverfahren (bzw. kombinierten Ansätzen) häufig bestätigt werden. So zeigten die Ergebnisse des Praxisbetriebs in Golzow[10] für acht von zehn Versuchsfeldern um 2 bis 18 Prozent reduzierte Düngermengen im Vergleich zur einheitlichen Bewirtschaftung; lediglich bei zwei Versuchen mit Sonnenblumen und Sommergerste wurde insgesamt mehr gedüngt. Dabei zeigte sich, dass die bei einheitlicher Bewirtschaftung ausgebrachte Düngermenge nur auf etwa 15 Prozent der Fläche optimal wäre – auf 85 Prozent der Fläche würde eine Über- oder Unterversorgung des Bodens mit Stickstoff erfolgen (Abb. 9).

Über alle Versuche gemittelt konnten rund 9,5 kg Stickstoff/ha eingespart werden. Auch der Ertrag konnte in den meisten Versuchen gesteigert werden, im besten Fall um 6 Prozent.[11] Ein negativer Einfluss der teilflächenspezifischen Stickstoffapplikation auf die Qualität der Ernteprodukte (z. B. auf den Proteingehalt von Getreide) wurde dabei nicht festgestellt. Ähnliche Ergebnisse liefern die Untersuchungen, die im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts preagro durchgeführt wurden (Wenkel et al. 2002). Sie zeigen insgesamt eine Verringerung des Stickstoffdüngeraufwandes um durchschnittlich 14 kg/ha bzw. 7 Prozent[12] bei größtenteils konstant bleibenden Erträgen.

Andere Untersuchungen zeigen weniger eindeutige Effekte der differenzierten Stickstoffdüngung. Auf den Versuchsbetrieben des Forschungsverbundes Agrarökosysteme München konnten auf einem Teil der Flächen bei reduzierter Düngermenge praktisch gleiche Erträge erwirtschaftet werden; z. T. jedoch brachten erhöhte Düngermengen niedrigere Erträge mit sich. Allerdings ist die Interpretation dieser widersprüchlichen Ergebnisse schwierig, zum einen aufgrund von Witterungseinflüssen und zum anderen wegen der undurchsichtigen Dokumentation der Versuchsergebnisse (Strecker et al. 2004a, S. 59).

---

[9] Überversorgte Flächen kommen gehäuft in Regionen mit hohen Viehdichten vor, bei den unterversorgten Flächen handelt es sich v. a. um Grünlandböden, die (z. B. im Rahmen von Agrarumweltprogrammen) zunehmend extensiv bewirtschaftet werden.

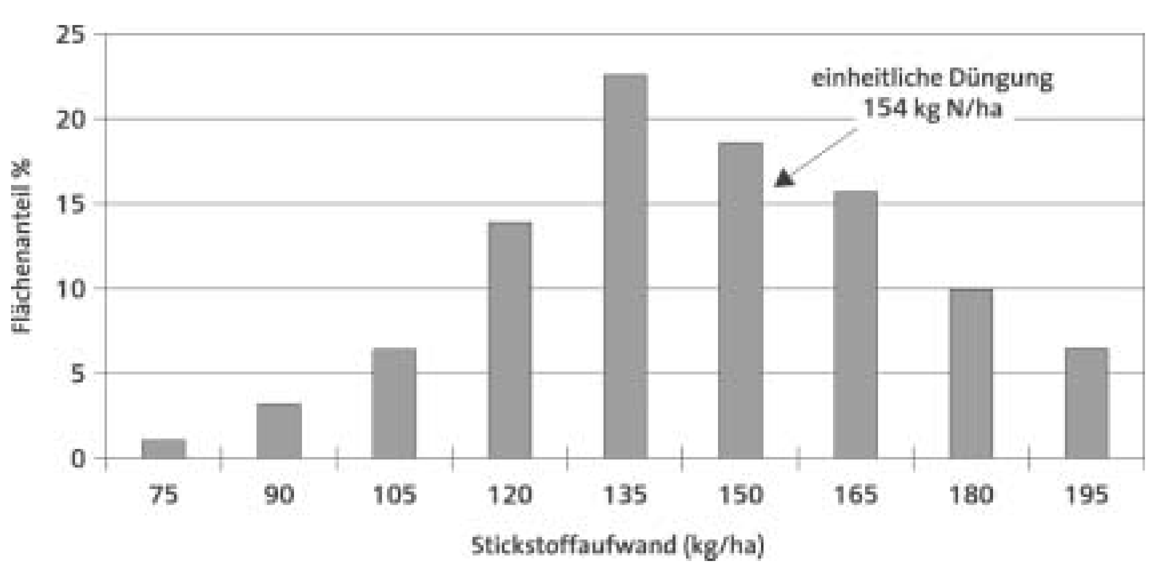
[10] Die Versuche fanden zwischen 1995 und 1999 auf fünf Schlägen in den Kulturen Winterweizen, Sommergerste, Körnermais und Sonnenblumen statt. Die erste Stickstoffgabe erfolgte auf Grundlage der Ertragserwartung (abgeleitet aus digitalisierten Bodenkarten, Luftbildern und Ertragskarten) sowie Bodenproben zur Bestimmung des Stickstoffgehalts. Für die zweite und dritte Düngergabe zu Winterweizen wurde ab 1999 mit dem Hydro-N-Sensor ein Onlineverfahren gewählt.

[11] Lediglich bei Sonnenblumen lag der Ertrag bei differenzierter Stickstoffdüngung (31,2 dt/ha) geringfügig unter dem Ertrag bei einheitlicher Düngung (31,4 dt/ha). Ansonsten wurden praktisch keine Ertragsänderungen bis hin zu Mehrerträgen ermittelt: bei Mais 0,2 bis 1,0 dt/ha (0 bis1 Prozent Mehrertrag im Vergleich zu einheitlicher Bewirtschaftung), bei Winterweizen 0,2 bis 3,9 dt/ha (0 bis 6 Prozent), bei Sommergerste 2,1 dt/ha (4 Prozent) sowie bei Sommergerste als Ganzpflanze 2,4 dt/ha (5 Prozent).

[12] Auf den einheitlich bewirtschafteten Flächen wurden insgesamt 193 kg N/ha ausgebracht, bei der teilflächenspezifischen Ausbringung im Mittel 179 kg N/ha.

Abbildung 9

Verteilung der Stickstoffapplikationsmenge eines Praxisbetriebs



Quelle: nach Schmerler et al. 2001, S. 129, geändert

Die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung mit Onlineverfahren zeigt i. d. R. positive ökonomische Effekte. Eine Untersuchung in 20 Betrieben (29 Felder, 950 ha Fläche) mit dem Yara N-Sensor® hat ergeben, dass bei 22 von 25 Versuchen die teilflächenspezifische Düngung Ertragssteigerungen gegenüber der flächeneinheitlichen Düngung mit sich brachte (Kilian/Grabo 2002). Im Durchschnitt aller Versuche betrug der Mehrertrag 2,6 dt/ha (entspricht 3,4 Prozent). Laut Anbieterangaben liegen mittlerweile in Deutschland 170 Ertragsversuche zur differenzierten Stickstoffdüngung mit dem Yara N-Sensor® vor. In diesen Untersuchungen konnten Ertragssteigerungen von bis zu 18 Prozent erzielt werden. Die mittlere Ertragssteigerung lag dabei gegenüber ortsüblicher Düngung bei rund 7 Prozent bei einem gleichzeitig um rund 14 Prozent verringertem Stickstoffaufwand (Leithold 2004, S. 28; http://www.agricon.de [Juli 2005]). In Einzelfällen sind höhere Stickstoffmengen ausgebracht worden, allerdings in Verbindung mit Mehrerträgen. Zudem sind Lagervermeidung, Druscherleichterung sowie Qualitätsverbesserungen zu verzeichnen.[13]

Mit einem anderen Onlineverfahren zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung, dem „Greenseeker®“, konnten Ertragssteigerungen von 2 dt/ha und Düngereinsparungen von 42 kg N/ha erreicht werden (Ehlert et al. 2004a, S. 42). Nach Ehlert et al. (2004b) konnte durch den Einsatz des CROP-Meters zur Onlinestickstoffdüngung in Getreidebeständen bei über vier Jahre durchgeführten Untersuchungen ein Mehrertrag von durchschnittlich 1,5 dt/ha bei einer Stickstoffeinsparung von 13 kg/ha erzielt werden. Nach Anbieterangaben (Praxisversuche über drei Jahre auf einigen hundert ha Fläche in fünf Betrieben) konnten ohne Ertrags- und Qualitätsverluste im Mittel 14 Prozent des Stickstoffdüngers gegenüber betriebsüblicher Ausbringung eingespart werden (Müller-Elektronik 2004).

Zusammenfassend bestätigen die vorliegenden Untersuchungen die erwarteten positiven Effekte hinsichtlich Düngemitteleinsparung oder Ertragssteigerung durch eine teilflächenspezifische Stickstoffausbringung. Bei Offlineverfahren weisen die Untersuchungsergebnisse tendenziell deutliche Düngereinsparungen bei gleich bleibenden Erträgen aus. Onlineverfahren dagegen zeigen durchweg positive Ergebnisse. Die Düngereinsparung beruht dabei v. a. auf dem Weglassen von Sicherheitszuschlägen (Leithold 2004, S. 29). In Einzelfällen kann die Gesamtmenge an ausgebrachtem Stickstoffdünger auch höher ausfallen als bei einheitlicher Ausbringung. Allerdings sind damit auch entsprechende Mehrerträge verbunden.

Teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung

Im Vergleich zur flächeneinheitlichen Unkrautbekämpfung kann die teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung zur Reduzierung sowohl der ausgebrachten Herbizidmenge als auch der Arbeits- und Gerätestunden führen. Das Einsparpotenzial unterliegt dabei verschiedenen Einflussfaktoren, insbesondere dem Anteil der mit Unkraut bewachsenen Gesamtfläche bzw. der Anzahl lokaler Unkrautnester. Der Bekämpfungsschwellenwert ist oft nur auf Teilflächen überschritten, so dass auch nur dort eine Bekämpfung durchgeführt werden muss.

Durch die Anwendung von Offlineverfahren (Kartenansatz meist auf Basis manueller Bonituren) kann die applizierte Herbizidmenge um rund 50 Prozent reduziert wer-

[13] Im Durchschnitt ist eine um 10 bis 20 Prozent höhere Druschleistung und ein um 30 Prozent vermindertes Auftreten von Lager sowie eine Zunahme im Rohproteingehalt um 0,2 bis 1,2 Prozent möglich (http://www.agricon.de).

den; bei einzelnen Versuchen wurden sogar Reduktionen bis knapp 90 Prozent erreicht. Bei einer Untersuchung über vier Jahre auf acht Flächen von insgesamt 106 ha in Winterweizen und Wintergerste wurde ein Reduktionspotenzial in Höhe von 39 Prozent (Grasunkräuter) bzw. 47 Prozent (Klettenlabkraut) ermittelt (Nordmeyer et al. 2003). In einem anderen, vierjährigen Versuch in Winterweizen, Wintergerste, Zuckerrübe und Mais in Rotation auf fünf Feldern mit rund 21 ha konnte der Herbizideinsatz im Mittel aller Versuche um 54 Prozent gesenkt werden, allerdings mit großen Unterschieden zwischen den Kulturarten, Versuchsjahren und Feldern (Timmermann et al. 2003). In einer weiteren Untersuchung mit der Fruchtfolge Mais, Winterweizen, Wintergerste und Zuckerrüben über vier Jahre auf vier Feldern mit rund 19 ha wurde über alle Versuche gemittelt bei Winterweizen die Herbizidaufwandmenge um 87 Prozent bei Grasunkräutern bzw. um 63 Prozent bei breitblättrigen Unkräutern reduziert. Bei Wintergerste lagen die Reduktionen um 55 Prozent bei Gräserherbiziden bzw. 76 Prozent bei Mitteln für breitblättrige Unkräuter. Bei Mais lagen die Werte bei 89 Prozent bzw. 11 Prozent (Gerhards et al. 2002b).

Auch Onlineverfahren zur teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung führten in Praxisversuchen zu einer deutlichen Reduktion der ausgebrachten Herbizidmenge, wenngleich insgesamt von geringeren Einsparpotenzialen berichtet wird. In einem Versuch unter Verwendung eines optoelektronischen Sensors im Bereich der Fahrspuren wurde die applizierte Herbizidmenge bei Erreichen einer kleinräumigen Schadensschwelle[14] bis zu einer Aufwandmenge von 50 Prozent des Ausgangswerts reduziert;[15] auf 76 Prozent der Untersuchungsfläche wurde die Schadensschwelle von 165 Unkrautpflanzen/m^2 nicht erreicht, was insgesamt zu einer Mengenreduktion von 12,7 Prozent gegenüber flächeneinheitlicher Applikation führte (Ehlert/Dammer 2002).

Da die bislang auf dem Markt verfügbaren optischen Sensoren nicht zwischen einzelnen Kulturpflanzen- und Unkrautarten unterscheiden können, sind bislang nur Anwendungen in Fahrgassen ohne Kulturpflanzen, vor dem Auflaufen der Kulturpflanzen und auf Brachflächen möglich. In diesen Einsatzbereichen sind die erzielbaren Mittelreduktionen allerdings hoch. Beim Einsatz des „Detectspray®-Systems“ lässt sich sowohl bei konservierender (z. B. Mulchsaat) als auch bei nicht konservierender Bodenbearbeitung in Mais der Herbizideinsatz um 30 bis 70 Prozent gegenüber einer Ganzflächenapplikation reduzieren (Lettner et al. 2001, S. 117 f.).

Insgesamt bestätigen sich somit die Erwartungen hinsichtlich verringerter Herbizidmengen für den Fall der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung auf einer guten Datengrundlage. Je nach den spezifischen Bedingungen vor Ort können häufig rund 50 Prozent der Herbizide (bei einer Spannbreite von rund 10 bis 90 Prozent) eingespart werden. Befürchtungen, dass eine Reduktion der Aufwandmenge von Herbiziden durch eine teilflächenspezifische Ausbringung zu einem erhöhten Unkrautdruck mit der Folge erhöhter Pflanzenschutzmittelaufwendungen in den Folgejahren führt, werden von den vorliegenden Untersuchungen nicht bestätigt (Nordmeyer et al. 2003).

Teilflächenspezifische Applikation weiterer Pflanzenbehandlungsmittel

Im Vergleich zur Herbizidapplikation liegen zur teilflächenspezifischen Ausbringung von Fungiziden, Insektiziden und Wachstumsregulatoren nur wenige Studien vor. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass es erheblich schwieriger ist, Pilzerkrankungen oder einen Schädlingsbefall in einem frühen Stadium zu erkennen, sicher zu identifizieren und in Entscheidungsalgorithmen umzusetzen.

Die vorliegenden Versuchsergebnisse weisen jedoch darauf hin, dass eine nennenswerte Reduzierung der Aufwandmengen von Pflanzenbehandlungsmitteln möglich ist. In Streifenversuchen zur differenzierten Fungizidapplikation in Winterweizen unter Verwendung des CROP-Meters (Kap. III.4) konnte z. B. gezeigt werden, dass gegenüber der Ganzflächenapplikation die Fungizidmenge um 10 bis 14 Prozent reduziert werden konnte, ohne dass Ertragsunterschiede aufgetreten sind (Ehlert/Dammer 2002). Nach Anbieterangaben lässt sich durch Verwendung des CROP-Meters die ausgebrachte Pflanzenschutzmenge durchschnittlich um 19 Prozent reduzieren (Müller-Elektronik 2004).

Die Pflanzen in schwach wüchsigen Teilbereichen eines Feldes müssen zum Erzielen der notwendigen Standfestigkeit nicht so stark durch Wachstumsregler eingekürzt werden als in stärker wüchsigen Teilflächen. Unter Praxisbedingungen liegen Ergebnisse hinsichtlich der Applikation von Chlormequat-Wachstumsreglern in Winterweizen im Offlineverfahren vor, die innerhalb des BMBF-Verbundprojekts preagro erzielt wurden (Ehlert/Dammer 2002). Eine Onlineapplikation mit spät einsetzbaren Wachstumsreglern auf Basis von Trinexapac erfolgte in Winterweizen entsprechend der gebildeten Pflanzenmasse mit dem o. g. CROP-Meter (Ehlert et al. 2004b). Hier konnte bei einem Versuch eine Einsparung der Wirkstoffmenge von 48 Prozent erreicht werden (nach Ehlert et al. 2004a, S. 51).

Die vorliegenden Untersuchungen für die genannten weiteren Pflanzenbehandlungsmittel erlauben derzeit somit keine fundierte Einschätzung des Einsparpotenzials durch eine teilflächenspezifische Applikation.

Automatische Spurführung

Der Nachweis positiver ökonomischer Effekte der automatischen Spurführung ist schwer zu führen (Klee/Hofmann 2005, S. 19): Grundsätzlich können Erntever-

---

[14] Die Kosten für die Herbizidbehandlung wurden mit rund 50 Euro/ha angenommen, der Verkaufspreis des Weizens mit rd. 12 Euro/dt. Die Herbizidapplikation ist demnach wirtschaftlich, wenn dadurch ein Mehrertrag von etwa 4,25 dt/ha erzielt werden kann. Dies ist bei rund 165 Unkrautpflanzen/m^2 der Fall.

[15] „Dies ist darin begründet, dass bei geringer werdender Verunkrautung die Konkurrenzkraft der Kulturpflanze zunimmt. Darüber hinaus wird das Unkraut durch die bis zu 50 Prozent reduzierte Herbizidmenge jedoch noch ausreichend geschädigt, sodass keine ertragswirksame Nachverunkrautung auftritt.“ (Ehlert/Dammer 2002, S. 279)

luste verringert werden, wenn die Pflanzenreihen neben der Fahrgasse (z. B. bei der Applikation von Pflanzenschutzmitteln) aufgrund exakterer Fahrweise nicht mehr überfahren werden. Zudem können Fehlapplikationen vermieden werden, da der Fahrer die Spritze besser kontrollieren kann. Der Schlepperhersteller John Deere geht davon aus, dass sich durch Anwendung seines satellitengestützten automatischen Lenksystems, z. B. beim Kalkstreuen, Überlappungen von etwa 10 Prozent vermeiden ließen. Auch bei der Bodenbearbeitung und Ernte könnte der Bearbeitungsaufwand durch Vermeidung von Überlappungen um rund 10 Prozent reduziert werden (Klee/Hofmann 2005, S. 20). Diese Angaben können durch Daten des KTBL (2004) gestützt werden, die in ihren Berechnungsgrundlagen von Überlappungen im Bereich von 7 Prozent ausgehen. In allen Fällen bedeuten diese Einsparungen eine Reduktion an Arbeitszeit, Energieverbrauch und Geräteverschleiß. Diese Einsparpotenziale sind bedeutend und für Landwirte rasch einsichtlich. In der Landwirtschaft nimmt deshalb die Nachfrage nach solchen Systemen gegenwärtig rasch zu.

4. Wirtschaftlichkeit auf Betriebsebene

Die Anwendung von PA-Verfahren ist wirtschaftlich, wenn der hierdurch erzielbare ökonomische Nutzen aufgrund von Betriebsmitteleinsparungen oder Mehrerträgen die damit einhergehenden Kosten übersteigt. Im Folgenden[16] wird die Frage der Wirtschaftlichkeit der einzelnen relevanten PA-Anwendungen auf Betriebsebene behandelt. Zu diesem Zweck werden auf Grundlage von plausiblen Annahmen für die betreffenden Maßnahmen Modellrechnungen angestellt, die zeigen sollen, unter welchen Bedingungen – d. h. vor allem ab welcher Betriebsgröße – die Wirtschaftlichkeit auf Betriebsebene erreicht wird. Dabei werden auch Berechnungen unter der Annahme sinkender Kosten für PA-Techniken – bzw. im Falle der Grunddüngung sinkender Kosten für Kartierarbeiten – durchgeführt.

In den Kalkulationen sind weder mögliche Synergieeffekte durch Mehrfachnutzungen bei einer umfassenden Anwendung von PA-Verfahren in einem Betrieb noch positive oder negative Effekte von PA-Anwendungen berücksichtigt, die nicht oder nur schwer quantifizierbar sind. Zudem ist die Verallgemeinerung der in den Kapiteln IV.2 und IV.3 dargestellten Untersuchungsergebnisse nicht unproblematisch, zum einen, weil die Anzahl der verfügbaren Arbeiten zwischen den Anwendungsfeldern sehr unterschiedlich ist, zum anderen, da die Kosten sowie v. a. mögliche Betriebsmitteleinsparungen und Mehrerträge von zahlreichen Faktoren abhängen (u. a. Kulturart, Heterogenität des Standorts, PA-Verfahren, Witterung) und daher einer mitunter signifikanten Variabilität unterliegen.

Darüber hinaus ist die Vergleichbarkeit und Interpretation der Daten schwierig, da unterschiedliche Ansätze zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit (z. B. Abschreibungszeiträume, Zinssätze) genutzt und verschiedene, teilweise in den Berechnungen nicht offen gelegte Annahmen (z. B. Berücksichtigung von Kosten der Informationsbeschaffung und Weiterbildung) zugrunde liegen (Strecker et al. 2004a, S. 15). Darüber hinaus sind die enthaltenen Informationen zu den Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit – etwa die vorherrschende Bodenheterogenität – i. d. R. nur spärlich. Insbesondere die meist fehlenden Angaben zur Betriebsgröße erschweren die Interpretation der Daten, da es für die Wirtschaftlichkeit aller Verfahren von entscheidender Bedeutung ist, auf welche Fläche oder erzeugte Produktmengen die anfallenden Kosten umgelegt werden. Die Untersuchungsergebnisse können jedoch zumindest Indizien liefern, welche PA-Verfahren zu positiven ökonomischen Wirkungen führen können und daher besondere Chancen zu einer breiteren Nutzung haben.

Teilflächenspezifische Aussaat

In der Literatur findet sich nur eine geringe Anzahl an Arbeiten zu den ökonomischen Wirkungen der teilflächenspezifischen Aussaat. Lambert/Lowenberg-DeBoer (2000), die in ihrer Übersichtsstudie insgesamt 108 Arbeiten zu den ökonomischen Wirkungen von PA ausgewertet haben, führen sechs Arbeiten zur differenzierten Aussaat auf. Fünf davon berichten von leicht positiven (2 bis 4 Euro/ha), eine von negativen ökonomischen Wirkungen. Nach Schmerler et al. (2001) lassen sich durch teilflächenspezifische Aussaat bei Winterweizen bzw. Mais Saatguteinsparungen von durchschnittlich 2,50 bis 10 Euro/ha erzielen; bei Mais kommen Mehreinnahmen durch die Ertragssteigerung in Höhe von rund 30 Euro/ha hinzu. Aufgrund der schwachen Datenbasis sowie der eher geringen ökonomischen Vorteile wird nachfolgend keine Modellrechnung zur teilflächenspezifischen Aussaat durchgeführt.

Teilflächenspezifische Grunddüngung mit Phosphat und Kalium

In den vorliegenden Untersuchungen überwiegen Berichte über die ökonomische Vorteilhaftigkeit der teilflächenspezifischen Grunddüngung, allerdings weist ein nicht unerheblicher Teil der Arbeiten negative ökonomische Ergebnisse aus. So berichten Lambert/Lowenberg-DeBoer (2000) von fünf Untersuchungen zur differenzierten Düngung mit Phosphat und Kalium in Mais drei Arbeiten von positiven, zwei hingegen von negativen ökonomischen Effekten. In je einer aufgeführten Studie für Kartoffeln und Weizen wird von positiven Effekten in Höhe von 20 bis 30 Euro/ha berichtet. Auch für die Grunddüngung mit Phosphat wurden positive ökonomische Wirkungen von 3 bis 6 Euro/ha beobachtet (Ostheim 2000). Auf der anderen Seite wurde gezeigt, dass für die Phosphatdüngung – bei gleich bleibenden Applikationsmengen und ohne Ertragseffekte – mit Verlusten durch PA-Verfahren zu rechnen ist (Weisz et al. 2003).

Bei der differenzierten Kalkung auf stark heterogenen und sauren Böden war eine Rentabilität des Verfahrens trotz Ertragssteigerungen nicht gegeben, da diese insbesondere durch die hohen Kosten der Rasterbodenbeprobungen der Felder überkompensiert wurden; insgesamt

[16] Das Kapitel basiert in weiten Teilen auf dem Gutachten von Strecker et al. (2004a).

beliefen sich die Verluste hier auf 13 US-Dollar/ha (entspricht zurzeit rund 11 Euro/ha). Bei längeren Betrachtungszeiträumen könnte die teilflächenspezifische Kalkung allerdings rentabel werden, da in den Folgejahren aufgrund des optimierten pH-Wertes des Bodens ohne weitere Beprobungen Mehrerträge möglich sind.

Für die Modellrechnung (Strecker et al. 2004a) wird eine differenzierte Düngung von Winterweizen mit einem Phosphat-Kalium-Dünger auf Grundlage von Applikationskarten angenommen. Die Investitionskosten für die PA-Technik belaufen sich auf rund 1 800 Euro. Bei einem Abschreibungszeitraum von fünf Jahren, jährlichen Reparaturkosten in Höhe von 1 Prozent des Anschaffungspreises sowie einem Zinssatz von 6 Prozent liegen die Kosten für die PA-Technik bei 442 Euro/Jahr (Tab. 9).

Die Kosten für die Bodenbeprobung (15 Euro/ha alle fünf Jahre) sowie die Ertragskartierung (10 Euro/ha) werden mit insgesamt 13 Euro/ha/Jahr angenommen. Insgesamt fallen somit – je nach Betriebsgröße – Kosten von jährlich rund 1 100 Euro (50 ha) bis 13 400 Euro (1 000 ha) an. Bedingt durch einerseits diese hohen Kosten und andererseits den relativ geringen Preis für Phosphat-Kalium-Dünger ist die teilflächenspezifische Grunddüngung auch bei sehr großen Betrieben zurzeit nicht wirtschaftlich. Sollten die Kosten für die Bodenuntersuchungen künftig erheblich gesenkt werden können – etwa durch praxisreife Verfahren für eine vereinfachte Bodenanalyse (Kap. III) – könnte sich die teilflächenspezifische Grunddüngung als wirtschaftlich erweisen. Die Modellrechnungen zeigen, dass bei einer Senkung der Kosten für die Bodenbeprobung und Ertragskartierung um 30 Prozent[17] in Betrieben mit mehr als 206 ha mit einem wirtschaftlichen Einsatz des Verfahrens gerechnet werden kann, vorausgesetzt die Betriebsmitteleinsparungen liegen bei 15 Prozent (Tab. 9). Bei einer weiteren Verringerung der Kartierungskosten um 50 Prozent[18] würde – ceteris paribus – die teilflächenspezifische Düngung mit Phosphat und Kalium bereits ab einer Betriebsgröße von 93 ha wirtschaftlich.

[17] Die Kosten für die Nährstoff- und Ertragskartierung belaufen sich dann auf 10 Euro/ha.

[18] Die Kosten für die Nährstoff- und Ertragskartierung belaufen sich dann auf 8 Euro/ha.

Tabelle 9

Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Düngung mit Phosphat und Kalium in Winterweizen

	Einsparung an Phosphat-Kalium-Dünger		
	5 %	**10 %**	**15 %**
PA-Technikkosten (Euro/Jahr)*	*442*	*442*	*442*
Kosten für Nährstoff-/Ertragskartierung (Euro/Jahr) für			
50 ha	*650*	*650*	*650*
100 ha	*1.300*	*1.300*	*1.300*
1.000 ha	*13.000*	*13.000*	*13.000*
PA-Gesamtkosten (Euro/Jahr) für			
50 ha	*1.092*	*1.092*	*1.092*
100 ha	*1.742*	*1.742*	*1.742*
1.000 ha	*13.442*	*13.442*	*13.442*
Aufwandmenge Dünger (dt/ha) (Referenzmenge: 3,0 dt/ha/Jahr)	*2,85*	*2,70*	*2,55*
Düngerpreis (Euro/dt)	*25,0*	*25,0*	*25,0*
Einsparungen (Euro/ha/Jahr)	*3,75*	*7,50*	*11,25*
Einsparungen für			
50 ha	*188*	*375*	*563*
100 ha	*375*	*750*	*1.125*
1.000 ha	*3.750*	*7.500*	*11.250*
Mindestnutzungsfläche (ha)	–	–	–
bei – 30 % Kartierungskosten	–	–	*206*
bei – 50 % Kartierungskosten	–	*443*	*93*

* Investitionskosten der Technik inklusive Software, ohne Kartierungskosten: rund 1 800 Euro, Abschreibungsdauer: fünf Jahre, Reparaturen: 1 Prozent der Investitionen pro Jahr, Zinssatz: 6 Prozent

Quelle: Strecker et al. 2004a

Teilflächenspezifische Stickstoffdüngung

Zu den ökonomischen Wirkungen einer teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung liegt eine verhältnismäßig große Anzahl an Untersuchungen vor. Lambert/Lowenberg-DeBoer (2000) analysierten 27 Studien. Dabei wiesen 13 von 18 untersuchten Studien für Mais positive ökonomische Effekte aus, eine Studie berichtete von negativen Effekten, in vier Fällen lagen keine eindeutigen Ergebnisse vor. Bei Weizen hingegen wies lediglich eine von fünf Studien auf positive ökonomische Effekte durch teilflächenspezifische Stickstoffdüngung hin, zwei Studien berichteten von negativen Auswirkungen, ebenfalls zwei von indifferenten Aussagen. Die größten positiven Effekte konnten bei Zuckerrüben gefunden werden (rund 96 Euro/ha), was auf das hohe Niveau der Deckungsbeiträge von Zuckerrüben und die Bedeutung der Stickstoffdüngung für die Qualität der Zuckerrüben zurückzuführen ist.

Schmerler et al. (2001) beziffern den monetären Nutzen durch die Stickstoffdüngereinsparung über alle Versuche bei Winterweizen auf 7,50 Euro/ha bzw. bei Körnermais auf 5,50 Euro/ha; hinzu kommen Mehreinnahmen durch Ertragssteigerungen von rund 20 Euro/ha bei Winterweizen sowie 6 Euro/ha bei Mais.

Die Auswertung von sechs Streifenversuchen des Forschungsverbundes Agrarökosysteme München in Scheyern zeigt, dass die untersuchten teilflächenspezifischen Stickstoffdüngestrategien nicht immer einen ökonomischen Vorteil erzielten (Strecker et al. 2004a, S. 59 ff.). Im Mittel über alle Versuche liegt der Deckungsbeitrag des Kartenansatzes sogar mit 25 Euro/ha unter dem Deckungsbeitrag der einheitlich gedüngten Variante. Die Autoren deuten dies als Hinweis darauf, dass mit den zur Verfügung stehenden Methoden der teilflächenspezifischen Düngung die ökonomischen Potenziale nicht sicher ausgeschöpft werden können. Zudem stellen sie fest, dass die Witterungseinflüsse den Erfolg von Düngestrategien wesentlich stärker zu beeinflussen scheinen als die räumliche Heterogenität.

Im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts preagro wurden an sechs verschiedenen Standorten durch teilflächenspezifische Stickstoffdüngung Änderungen des Deckungsbeitrags von – 105 bis 84 Euro/ha (Mittelwert – 5 Euro/ha) bei Winterweizen festgestellt (Dabbert/Kilian 2002). Die großen Schwankungen in den Ergebnissen zeigen, dass „keine allgemein gültigen Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Düngung gemacht werden können“ (Strecker et al. 2004a, S. 17).

Die nachfolgend dargestellten Modellrechnungen zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung (Strecker et al. 2004a) gehen davon aus, dass diese mit einem Yara N-Sensor® und einem Rauch-Düngerstreuer in Winterweizen durchgeführt wird. Für die PA-Technik werden Anschaffungskosten in Höhe von rund 26 000 Euro unterstellt; für Abschreibung, Reparaturen und Zins werden jährliche Kosten in Höhe von rund 6 400 Euro zugrunde gelegt (Tab. 10).

Bei flächeneinheitlicher Applikation wird mit einer Aufwandmenge von rund 6,5 dt Kalkammonsalpeter (enthält 27 Prozent Stickstoff)/ha/Jahr (entspricht 175 kg N/ha) zu einem Preis von rund 18 Euro/dt Dünger gerechnet. Es zeigt sich, dass bei einer unterstellten Düngereinsparung von 5 Prozent die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung für Betriebe unter 1 000 ha nicht rentabel ist; bei Einsparungen von 10 Prozent und darüber ist der Einsatz des Yara N-Sensors® für Betriebe ab rund 550 ha rentabel (Tab. 10). Unterstellt man eine Senkung der Investitionskosten um 30 bzw. 50 Prozent, so lohnt sich die teil-

Tabelle 10

Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung in Winterweizen

	Einsparung an Stickstoffdünger		
	5 %	**10 %**	**15 %**
PA-Kosten (Euro/Jahr)*	*6.396*	*6.396*	*6.396*
Aufwandmenge Dünger (dt/ha) (Referenzmenge: 6,5 dt/ha/Jahr)	*6,18*	*5,85*	*5,53*
Düngerpreis (Euro/dt)	*18,0*	*18,0*	*18,0*
Einsparungen (Euro/ha/Jahr)	*5,76*	*11,7*	*17,5*
Mindestnutzungsfläche (ha)	*1.093*	*547*	*364*
bei – 30 % Investitionskosten (ha)	*765*	*383*	*255*
bei – 50 % Investitionskosten (ha)	*547*	*273*	*182*

* Investitionskosten der Technik inklusive Software: rund 26 000 Euro, Abschreibungsdauer: fünf Jahre, Reparaturen: 1 Prozent der Investitionen pro Jahr, Zinssatz: 6 Prozent

Quelle: Strecker et al. 2004a

flächenspezifische Stickstoffdüngung bei einer Reduktion des Düngerverbrauchs von 10 Prozent bereits für Betriebe ab rund 380 bzw. 270 ha. Da bei den Berechnungen mögliche Ertragssteigerungen nicht berücksichtigt werden, ist davon auszugehen, dass die Rentabilität der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung mit dem Yara N-Sensor® im Falle einer Ertragssteigerung bereits für kleinere Betriebe bzw. geringere Düngereinsparungen gegeben ist.

Teilflächenspezifischer Pflanzenschutz

Im Bereich des Pflanzenschutzes liegen v. a. für die teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung Wirtschaftlichkeitsberechnungen vor. Nach Lambert/Lowenberg-DeBoer (2000) berichten sechs von sieben untersuchten Studien von positiven ökonomischen Effekten von teilflächenspezifischen Pflanzenschutzmaßnahmen, lediglich eine Studie zeigte negative Effekte.

Für die differenzierte Applikation von Herbiziden wird angegeben, dass sich Einsparungen – je nach Herbizidmenge und deren Preis – zwischen 20 Euro/ha in Zuckerrüben und 42 Euro/ha in Mais erzielen lassen (Timmermann et al. 2003). Allerdings übersteigen nach diesen Angaben die Kosten für die zeitaufwendige manuelle Unkrautbonitur die genannten Einsparungen, so dass die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens in diesen Fällen nicht gegeben ist. Nach Lettner et al. (2001, S. 107) ist es „schwer abzuschätzen, ob die zusätzlichen Investitionen und der Wert der zusätzlichen Arbeitsstunden, die eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung mit Onlineverfahren erfordern, durch den Wert der eingesparten Herbizide ausgeglichen werden können.“ Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von Onlineverfahren liegen bislang nicht vor.

Im Modellbeispiel wird die Wirtschaftlichkeit einer differenzierten Herbizidapplikation mit dem „Detectspray®“[19] in Winterweizen untersucht. Nimmt man an, dass durch die teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung rund 10 Prozent der Herbizidmenge eingespart werden können, ist die Anschaffung dieser Technik für Betriebe ab rund 430 ha interessant (Tab. 11). Geht man davon aus, dass die durch diese PA-Anwendung verursachten Kosten künftig um die Hälfte sinken werden, so ist bei einer Betriebsmitteleinsparung von 10 Prozent bereits für Betriebe ab 215 ha mit Zuwächsen beim Deckungsbeitrag zu rechnen. Für den Fall, dass sich höhere Einsparpotenziale (50 Prozent) bei der Herbizidausbringung realisieren ließen, wäre das Verfahren bereits für Betriebe ab 86 ha wirtschaftlich. Diese im Vergleich zur differenzierten Stickstoffdüngung niedrigeren Wirtschaftlichkeitsschwellen lassen sich auf die höheren Einsparpotenziale sowie die hohen Kosten für Pflanzenschutzmittel (20 Euro/l bei einer Aufwandmenge von 4 l/ha/Jahr) zurückführen.

Rückgänge beim Anschaffungspreis dieser PA-Technik würden zu deutlichen Erhöhungen des Deckungsbeitrags führen bzw. ihren Einsatz auch für kleinere Betriebe bzw. Anwendungsflächen wirtschaftlich gestalten. Bei einer Verringerung der Kosten für das Detectspray®-System um 30 Prozent wäre sein Einsatz im Fall einer 50 prozentigen

[19] Bislang ist dieses Onlineverfahren nur vor dem Auflaufen der Kulturpflanzen oder in Fahrgassen ohne Kulturpflanzen möglich (Kap. IV.3). Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit der Wirtschaftlichkeit anderer PA-Verfahren wurde jedoch Winterweizen als Kultur gewählt.

Tabelle 11

Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Herbizidapplikation in Winterweizen

	Herbizideinsparung		
	10 %	**25 %**	**50 %**
PA-Kosten (Euro/Jahr)*	3.444	3.444	3.444
Aufwandmenge Herbizid (l/ha) (Referenzmenge: 4,0 l/ha)	3,60	3,00	2,00
Herbizidpreis (Euro/l)	20,0	20,0	20,0
Einsparungen (Euro/ha/Jahr)	8,0	20,0	40,0
Mindestnutzungsfläche (ha)	431	172	86
bei – 30 % Investitionskosten (ha)	301	121	60
bei – 50 % Investitionskosten (ha)	215	86	43

* Investitionskosten der Technik: rund 14 000 Euro, Abschreibungsdauer: fünf Jahre, Reparaturen: 1 Prozent der Investitionen pro Jahr, Zinssatz: 6 Prozent

Quelle: Strecker et al. 2004a

Herbizideinsparung bereits für Betriebe ab 60 ha wirtschaftlich. Wird von einem nur halb so hohen Einsparpotenzial ausgegangen (25 Prozent), dann müsste die Betriebsfläche für einen wirtschaftlichen Betrieb von Detectspray® doppelt so groß sein (rd. 120 ha). Bei einer Halbierung der Anschaffungskosten würde – ceteris paribus – die Wirtschaftlichkeitsschwelle auf 43 ha (50 Prozent Herbizidreduktion) bzw. 86 ha Betriebsfläche (25 Prozent Herbizidreduktion) sinken.

Die modellhafte Berechnung der Wirtschaftlichkeit einer teilflächenspezifischen Applikation von Wachstumsreglern mit dem CROP-Meter in Verbindung mit Spritztechnik der Firma Dammann ist in Tabelle 12 dargestellt. Die Wirtschaftlichkeitsschwelle der teilflächenspezifischen Wachstumsreglerapplikation liegt bei einer 10 prozentigen Einsparung bereits bei einer Betriebsgröße von rund 270 ha, bei einer Reduktion der Investitionskosten um 30 Prozent bereits bei rund 190 ha.

Insgesamt unterstreichen die Modellrechnungen zur Wirtschaftlichkeit teilflächenspezifischer Betriebsmittelausbringung die Bedeutung der Betriebsgröße für die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen PA-Verfahren. Daneben wird deutlich, dass auch die Kosten für die Anschaffung und Verwendung der PA-Technik sowie die Preise der eingesparten Betriebsmittel eine große Rolle spielen bei der Erreichung der Wirtschaftlichkeitsschwelle von PA-Anwendungen. Wie Tabelle 13 zeigt, ist die Herbizidapplikation das zurzeit vergleichsweise wirtschaftlich interessanteste PA-Ver-fahren. Ein mittleres Einsparpotenzial und eine mäßige Verringerung des Preises für die PA-Technik vorausgesetzt, kann diese PA-Technik bereits in Betrieben ab rund 120 ha wirtschaftlich eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu ist bei der teilflächenspezifischen Grunddüngung nur im Fall hoher Einsparungen an Betriebsmitteln und Reduktionen bei den Kosten für die Bodenanalyse und Ertragskartierung ein wirtschaftlicher Einsatz möglich. Aufgrund der gleichzeitigen Degression von Managementkosten bei größeren Bewirtschaftungseinheiten ist zu folgern, dass eher größere Betriebe dazu neigen werden, managementintensive PA-Techniken einzusetzen.

Der Einfluss der Betriebsgröße auf die Wirtschaftlichkeit von PA-Technologien ergibt sich erstens durch die Abschreibungsdauer – je länger diese ist, umso höher ist der Zinsanteil an der Annuität (Abschreibung plus Zinsen). Zweitens wird – bedingt durch Skaleneffekte – die Annuität bei größeren Betrieben auf eine größere Fläche verteilt, wodurch bei einer zeitabhängigen Abschreibung die Anschaffungskosten auf mehr Hektar verteilt werden können (Lettner et al. 2001, S. 124). Im Falle von PA-Techniken wird generell von einer Nutzungsdauer von fünf Jahren, unabhängig von der Betriebsgröße, ausgegangen.

Tabelle 12

Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Wachstumsreglerapplikation in Winterweizen

	Wachstumsreglereinsparung		
	5 %	**10 %**	**15 %**
PA-Kosten (Euro/Jahr)*	2.854	2.854	2.854
Aufwandmenge (l/ha) (Referenzmenge: 2,0 l/ha)	1,90	1,80	1,70
Preis Wachstumsregler(Euro/l)	52,0	52,0	52,0
Einsparungen (Euro/ha/Jahr)	5,20	10,40	15,60
Mindestnutzungsfläche (ha)	549	274	183
bei – 30 % Investitionskosten (ha)	384	192	128
bei – 50 % Investitionskosten (ha)	274	137	91

* Investitionskosten der Technik: rund 11 600 Euro, Abschreibungsdauer: fünf Jahre, Reparaturen: 1 Prozent der Investitionen pro Jahr, Zinssatz: 6 Prozent.

Quelle: Strecker et al. 2004a

Tabelle 13

Mindestnutzflächenbedarf zum Wirtschaftlichen Einsatz von PA-Verfahren in Winterweizen

	Reduzierung des Betriebsmitteleinsatzes um[1]					
	5 %		10 %		15 %	
	Reduzierung der Investitionskosten[2] um					
	30 %	50 %	30 %	50 %	30 %	50 %
	Mindestnutzfläche (ha)					
Grunddüngung mit P und K				206	443	93
Stickstoffdüngung	766	547	383	273	255	182
Herbizidapplikation	301	215	121	86	60	43
Wachstumsreglerapplikation	384	274	192	137	128	91

1 Bei der Herbizidapplikation liegen die unterstellten Einsparungen bei 10, 25 und 50 Prozent.
2 Bei der Grunddüngung handelt es sich um reduzierte Kosten der Datenerfassung.
Quelle: Strecker et al. 2004a

5. Diffusion und Akzeptanz

Eine wesentliche Voraussetzung für die betriebliche Einführung von PA ist die Akzeptanz von Seiten der Landwirte.[20] Unabhängig von der Bewirtschaftungsweise sind für den Einsatz von PA-Verfahren in erster Linie Erwartungen hinsichtlich der damit verknüpften betriebswirtschaftlichen Vorteile ausschlaggebend. Die Wirtschaftlichkeit von PA-Verfahren hängt wiederum von verschiedenen Einflussfaktoren ab, wie Anschaffungspreis, Flächenausstattung, Bodenheterogenität, Bewirtschaftungsintensität, Betriebsmittelpreise und Erzeugerpreisniveau. Für einen wirtschaftlichen Einsatz müssen die Investitions- und Einsatzkosten (einschl. Reparatur und Wartung) für PA einzelbetrieblich durch Einsparungen bei den Betriebsmitteln oder höhere Erträge abgedeckt bzw. überstiegen werden. Die Ergebnisse zu den mit teilflächenspezifischen Bewirtschaftungsmaßnahmen erzielbaren Betriebsmitteleinsparungen oder Mehrerträgen sind jedoch nur bei bestimmten PA-Anwendung (insbesondere die Herbizidapplikation und Stickstoffdüngung) eindeutig positiv (Kap. IV.3).

Darüber hinaus bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der Übertragbarkeit der in Forschungsprojekten erzielten Ergebnisse auf andere Kulturarten und auf konkrete Betriebe bzw. Standorte mit vom Versuchsstandort abweichenden Boden- und Witterungsverhältnissen. Weitere Gründe für die hinter den Erwartungen zurückbleibende Diffusion von PA-Verfahren sind Befürchtungen hinsichtlich der Funktionalität und dem zusätzlichem Arbeitsbedarf für die Implementierung der Technik, dem Bedarf an Aus- und Weiterbildung sowie den Zeitbedarf für Managementaufgaben.

20 Das Kapitel basiert in weiten Teilen auf den Gutachten von Ehlert et al. (2004) und Werner/Christen (2004).

Nachfolgend werden der Stand der Anwendung von PA im Ausland und in Deutschland dargestellt und die wichtigsten Hemmnisse für eine breite Diffusion von PA aufgezeigt.

Diffusion

Die Verbreitung von PA-Anwendungen seit den frühen 1990er Jahren erfolgte eher zögerlich und sowohl geografisch als auch zeitlich in sehr unterschiedlichem Maße. Dabei dürfte die Annahmerate für PA nur in bestimmten Regionen der USA und Kanadas, wo die Betriebe und Parzellen vergleichsweise groß sind, die 5-Prozent-Grenze überschritten haben (Swinton/Lowenberg-DeBoer 2001, nach Ehlert et al. 2004a). Die gleichen Autoren schätzen die PA-Anwendungsquoten für Australien, Brasilien, Dänemark, Großbritannien und Deutschland auf 1 bis 5 Prozent der Fläche. Die Nutzung von PA in Japan ist schwierig einzuschätzen; es wird allerdings davon ausgegangen, dass trotz Unterstützung durch das Landwirtschaftsministerium die Annahmerate gering ist, bedingt durch die ungünstigen natürlichen und strukturellen Rahmenbedingungen.

Eine Erhebung aus dem Jahr 1998 ergab, dass von den befragten rund 8 500 US-Landwirten ca. 4 Prozent eine oder mehrere PA-Techniken anwendeten (Daberkow/McBride 2000, nach Ehlert et al. 2004). Allerdings gibt es signifikante Unterschiede in der Verwendung hinsichtlich Betriebsgröße, Betriebstyp und genutzter PA-Technik. Die Umfragen zeigen weiter, dass – gemessen am Bruttoumsatz – die Betriebsgröße ist mit dem Einsatz von PA positiv korreliert. Landwirtschaftliche Betriebe mit einer Jahresbruttoproduktion von über 500 000 US-Dollar haben eine überdurchschnittlich hohe PA-Anwendungsrate von 18 Prozent; bei Farmen unter 100 000 US-Dollar

liegt die Anwendungsrate dagegen im Durchschnitt bei nur 2 Prozent.

Dieselbe Untersuchung ergab, dass Marktfruchtbetriebe mit überwiegend Getreide- und Ölfruchtanbau mit 14 Prozent die höchste Anwendungsrate aufwiesen. Dies hängt insbesondere mit der weit verbreiteten Nutzung von Ertragskartierungssystemen während der Ernte zusammen. Von den überwiegend getreideproduzierenden Betrieben in Zentral-Kentucky nutzen im Jahr 2001 rund 16 Prozent der Landwirte PA-Anwendungen (Grusy 2003). Von diesen PA-Nutzern wiederum wendeten 72 Prozent rasterförmige Bodenbeprobungen und 62 Prozent teilflächenspezifische Applikationsmaßnahmen (v. a. Stickstoffdüngung) an. Die variable Aussaat wurde von 21 Prozent und die Herbizidapplikation von rund 9 Prozent der PA-Anwender praktiziert. Des Weiteren benutzten 23 Prozent rechnergestützt erstellte Ertrags- und Profitkarten für ihre Managemententscheidungen.

Betrachtet man die Ergebnisse über die Verbreitung der verschiedenen PA-Anwendungen in den USA (Daberkow/McBride 2000, nach Ehlert et al. 2004), wird deutlich, dass im Jahr 1998 die rasterförmige Bodenbeprobung (2 Prozent), die teilflächenspezifische Düngung (2 Prozent) und die Ertragskartierung (1 Prozent) zu den am weitesten verbreiteten PA-Verfahren zählen. Die standortdifferenzierte Aussaat und der teilflächenspezifische Pflanzenschutz waren dagegen in weniger als 1 Prozent der Betriebe im Einsatz. Untersuchungen zur Annahme von PA in Dänemark und Großbritannien zeigen, dass auch dort die Ertragskartierung zu den am weitesten verbreiteten PA-Anwendungen gehört; allerdings war die Annahmerate für PA zur Ertragskartierung höher als die für rasterförmige Bodenbeprobungen und teilflächenspezifische Düngung (Pedersen et al. 2001).

Für Deutschland liegen relativ wenige Untersuchungen vor, die die Anwendung und Diffusion von PA-Verfahren beschreiben. Eine repräsentative Befragung von 1 Prozent der deutschen Messebesucher (rund 1 700 Landwirte) auf der Landtechnikausstellung Agritechnica 2001 zur zeitlichen und regionalen Diffusion von PA (Gumpertsberger/Jürgens 2003, nach Ehlert et al. 2004, S. 64) ergab, dass von den Befragten

– 7 Prozent bereits PA-Techniken anwendeten,
– 9 Prozent beabsichtigten, in den nächsten drei Jahren einzusteigen,
– 35 Prozent Kenntnisse über PA hatten, jedoch nicht beabsichtigten, in den nächsten drei Jahren einzusteigen und
– 45 Prozent keine Beziehung zu PA hatten.

Eine erneute Befragung im Jahr 2005 (Jürgens 2006) hat gezeigt, dass der Anteil der „Uninformierten“ auf 43,9 Prozent gesunken und die Gruppe der Nutzer gewachsen ist, allerdings nur geringfügig.

Die in der Praxis hauptsächlich eingesetzten PA-Verfahren sind die Flächenvermessung, die Bodenbeprobung und die Ertragskartierung, alles Verfahren die der Informationsgewinnung dienen. Im Gegensatz dazu werden PA-Verfahren, die die gewonnenen Informationen in teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen umsetzen (z. B. die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung mit dem Sensoransatz) nur von bis zu 20 Prozent der PA-Nutzer eingesetzt (Jürgens 2006). Diese Diskrepanz könnte auf Probleme mit der komplexen Dateninterpretation, unzureichende Algorithmen zur Entscheidungsfindung oder hohe Kosten zur Erstellung hinreichend genauer Applikationskarten zurückzuführen sein. Spurführungssysteme auf der Grundlage satellitengestützer Ortungssysteme werden erst seit relativ kurzer Zeit auf dem Markt angeboten, werden aber bereits von jedem vierten PA-Nutzer (bei den Lohnunternehmern ist es schon jeder zweite Nutzer) genutzt (Jürgens 2006). Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese leicht handhabbar sind und auch ohne weitere Anwendung von PA eingesetzt werden können.

Untersuchungen zur Charakterisierung von PA-Nutzern ergab, dass PA-Techniken insbesondere von jungen, gut ausgebildeten, computernutzenden Landwirten mit überdurchschnittlich großer Flächenausstattung sowie in betriebsübergreifenden Bewirtschaftungsformen (z. B. Gerätegemeinschaften, Maschinenringe, Lohnunternehmer) eingesetzt werden (Doluschitz 2003; Griffin 2000, nach Zhang et al. 2002). Die durchschnittliche Betriebsgröße von PA-Nutzern liegt nach Befragungen von Jürgens (2006) zwischen 1 080 ha (2001) und 904 ha (2005). Dies ist nicht weiter verwunderlich, da die Investitionen für eine Mindestausstattung an PA-Technik v. a. für größere Betriebe oder auch für Erzeuger-, Maschinengemeinschaften oder Lohnunternehmer lohnend sind (Kap. IV.4). Für Lohnunternehmer stellen PA-Techniken und ihre Anwendungsfelder eine interessante Erweiterung ihrer Geschäftsaktivitäten dar. Sie können neben der Maßnahmendurchführung in Form der Teilflächenbewirtschaftung auch die Datenerfassung, -bearbeitung und -verwaltung sowie die Maßnahmenplanung im Rahmen von PA als zu entgeltende Dienstleistung anbieten.

Akzeptanz

Die Akzeptanzrate ist für die verschiedenen PA-Anwendungen unterschiedlich und abhängig von der Betriebsgröße, dem Betriebstyp, den Standortverhältnissen und der Einstellung des Betriebsleiters. Dennoch lassen sich auf der Basis der vorliegenden Untersuchungen auch einige verallgemeinernde Aussagen machen über die Akzeptanz von PA-Techniken bzw. die Gründe, die zum jetzigen Zeitpunkt gegen ihren Einsatz sprechen.

Allgemein sind die Landwirte zunächst an Produktionsverfahren interessiert, die relativ rasch wirtschaftlicher und arbeitssparender sind als deren Vorläufer. Solche technischen Entwicklungen sind oft eher mit Vereinfachungen der Arbeitsverfahren und von Produktionsabläufen verbunden als mit einer verstärkten Verwendung von Informationstechnologien (Thysen 2000, nach Werner/Christen 2004, S. 131). Die Modellberechnungen zeigen (Kap. IV.4), dass eine wirtschaftliche PA-Nutzung zurzeit nur in bestimmten Anwendungsbereichen und bei Ein-

satzflächen bzw. in Betrieben mit mehreren hundert ha bewirtschafteter Fläche möglich ist. Ein Vergleich mit der durchschnittlichen Flächenausstattung je Betrieb in Deutschland (in 2004 bei Haupterwerbsbetrieben rund 51 ha landwirtschaftlich genutzte Fläche; Kap. II.1) macht deutlich, dass zurzeit PA nur für überdurchschnittlich große Betriebe interessant ist. Diese Betriebe dürften v. a. in den neuen Ländern liegen, da dort die Durchschnittsgröße je Betrieb bei 197 ha beträgt. Die ungünstigen agrarstrukturellen Produktionsbedingungen in den meisten alten Bundesländern (kleine Betriebe und kleine Felder) stellen damit ein entscheidendes Hemmnis für einen breiten Einsatz von PA dar.

Mit der so genannten Gewannebewirtschaftung (Auernhammer et al. 2000) liegt ein Ansatz vor, der allerdings auch für eine kleinteilige Flächenausstattung einen wirtschaftlichen Einsatz von PA ermöglichen kann. Dabei legen interessierte Landwirte ihre unmittelbar aneinandergrenzenden Flächen zusammen und bewirtschaften sie gemeinsam. Die Kosten und Leistungen können anhand der Besitzverhältnisse zu den Flächen exakt abgerechnet werden. Allerdings ist die Bereitschaft der Landwirte zur Gewannebewirtschaftung eher verhalten und die Verständigung der beteiligten Landwirte über die anzubauenden Kulturarten und die Bewirtschaftungsmaßnahmen gestaltet sich schwierig.

Neben der gegenwärtig unzureichenden Wirtschaftlichkeit von PA-Anwendungen gibt es weitere Gründe, warum die Diffusion von PA deutlich hinter den Erwartungen zurückbleibt. Diese sind u. a. (in Anlehnung an Jürgens 2006; Strecker et al. 2004a; Zhang et al. 2002):

– erhebliches Informationsdefizit zu PA und seinen Potenzialen sowie fehlende solide Praxisempfehlungen zu PA;

– mangelnde Kompatibilität der Technik, d. h. fehlende technische Normen bei Geräteschnittstellen (angemahnt wird die Standardisierung des ISOBUS-Systems);

– Bedenken bezüglich der Funktionalität und Zuverlässigkeit der Technik (insbesondere der EDV-Ausrüstung) und fehlende Bereitschaft und Zeit, sich mit Kinderkrankheiten der Technik auseinanderzusetzen;

– unzureichende Unterstützung bei der Implementierung von PA;

– hoher Zeitbedarf für Einarbeitung, Managementaufgaben und Weiterbildung;

– Befürchtungen, dass mittels PA erfasste Daten von der Regierung oder Kreditgebern zur Betriebskontrolle benutzt werden könnten.

Die Bereitschaft von Landwirten, PA-Techniken in ihre Bewirtschaftungspraxis zu übernehmen, wird auch durch die persönliche Wahrnehmung und individuelle Abwägung und Gewichtung der möglichen Risiken bzw. Gewinnchancen bei den einzelnen PA-Anwendungen beeinflusst. Dies zeigt sich beispielsweise daran, dass auch neue Techniken und Verfahren, deren wirtschaftliche Vorteile in wissenschaftlichen bzw. praxisnahen Untersuchungen belegt sind, nicht oder nur zögerlich in der Praxis angenommen werden, wenn sie zu einem höheren Arbeitszeitbedarf und Managementaufwand gegenüber bisher verwendeten oder alternativen Technologien führen (Smith 2002, S. 130, nach Werner/Christen 2004). Ein Beispiel hierfür ist die in der Praxis zögerliche Annahme der durchaus profitablen, aber managementaufwendigen Techniken des integrierten Pflanzenschutzes.

Diejenigen Landwirte, die schon PA einsetzen, waren nach einer Umfrage mit ihrer Entscheidung größtenteils zufrieden (Gumpertsberger/Jürgens 2003, nach Ehlert et al. 2004). Für ihre Entscheidung zugunsten von PA gaben sie v. a. die üblichen ökonomischen Gründe (Gewinnsteigerung, Kostensenkung, höhere Ernteerträge, Qualitätssicherung) an. Zudem würden sie in der Beschäftigung mit PA eine deutlich bessere Kenntnis über ihre Produktionsstandorte erlangen und dadurch sichere Entscheidungen fällen können. Darüber hinaus gewinnt auch die vereinfachte Dokumentation der durchgeführten Maßnahmen zunehmend an Bedeutung als Motivation für den Einstieg in PA (Jürgens 2006). Auch die Umfragen von Pedersen et al. (2001) ergaben, dass die PA-Anwender allgemein zufrieden und optimistisch waren hinsichtlich der mit PA erzielbaren umweltentlastenden Effekte und Gewinnsteigerungen durch Betriebsmitteleinsparungen oder Mehrerträge[21]; allerdings erwarteten sie diese erst nach einer Einarbeitungs- und Anwendungsphase von fünf bis zehn Jahren.

6. Fazit

Eine Wirtschaftlichkeit von PA-Anwendungen ist dann gegeben, wenn der Mehrerlös aufgrund von Betriebsmitteleinsparungen und Mehrerträgen die durch Anschaffung und Verwendung der PA-Technik anfallenden Kosten übersteigt. In der Wirtschaftlichkeitsberechnung müssten eigentlich auch kaum bzw. nicht quantifizierbare Auswirkungen berücksichtigt werden, zu denen sowohl positive Effekte (z. B. höhere Qualität der Ernteprodukte) als auch negative Effekte (z. B. erhöhter Managementaufwand) zählen können. Schließlich müssten auch mögliche Synergieeffekte durch integrative PA-Praktiken – d. h. insbesondere Mehrfachnutzungen von Daten und Geräten – bei der Analyse ökonomischer Auswirkungen von PA in die Berechnungen eingehen. Deshalb sind zurzeit nur vereinfachte Betrachtungen und Modellrechnungen möglich.

Die ökonomischen Effekte teilflächenspezifischer Bewirtschaftungsmaßnahmen hängen von den spezifischen Produktionsbedingungen (Standortfaktoren, Kulturart, angewandete PA-Technik usw.) ab und sind nicht ohne Weiteres verallgemeinerbar. Dennoch lassen sich einige grundsätzliche Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von PA identifizieren. Dabei handelt es sich insbesondere um die Standortheterogenität und die Betriebsgröße. Grundsätzlich gilt: Je größer die Betriebsfläche und je

[21] In Großbritannien jedoch wurde das Potenzial von PA zur Ertragssteigerung eher negativ beurteilt; dies ist angesichts des dortigen hohen Ertragsniveaus verständlich.

heterogener die feldinternen Standortbedingungen sind, um so eher erreichen PA-Anwendungen die Wirtschaftlichkeitsschwelle. Bei überbetrieblicher Organisation des Maschineneinsatzes (z. B. durch Lohnunternehmer) können PA-Verfahren allerdings auch in Gebieten mit kleinteiliger Flächenausstattung rentabel sein. Auch die Höhe des Betriebsmitteleinsatzes und der Grad der Integration von PA-Anwendungen in Betriebs- und Produktionsabläufe korreliert mit der Wirtschaftlichkeit von PA. Schließlich haben auch die Preise für Datenerfassung, PA-Technik und Betriebsmittel sowie die am Markt erzielbaren Preise für landwirtschaftliche Produkte einen bedeutenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von PA-Verfahren.

Die Ausgaben für PA-Anwendungen setzen sich im Wesentlichen zusammen aus Kosten für Datenerfassung, Datenmanagement- und Beratungssysteme sowie für Applikations- und Navigationstechnik. Dabei können einmalige (z. B. Anschaffungskosten für Bodenkarten) von regelmäßig anfallenden Kosten (z. B. Bodenbeprobungen, GPS-Referenzsignale) unterschieden werden. Für die Datenerfassung in Offlineverfahren können auf relativ günstig verfügbare Bodenkarten, Fernerkundungsdaten u. ä. zu Preisen im Bereich von 3 bis 10 Euro/ha zurückgegriffen werden. Die Datenerfassung mittels manueller Unkrautbonituren ist mit 10 bis 50 Euro/ha sehr teuer.

Zur automatischen Datenerfassung können Sensorsysteme erworben werden, deren Kosten sich im Bereich von 5 000 Euro (Korndurchsatzsensoren für die Ertragskartierung) bis 9 000 Euro (Sensor zur Messung der Bodenleitfähigkeit) bewegen. Die Kartierung von Bodenleitfähigkeit, Ertrag und Bodennährstoffen lässt sich auch als Dienstleistung zu Preisen von etwa 6 bis 15 Euro/ha beziehen. Für Onlineverfahren werden Sensorsysteme eingesetzt, deren Kosten sich von 5 800 Euro für den CROP-Meter (zuzüglich 5 800 Euro für die Spritztechnik) bis rund 26 000 Euro für den Yara N-Sensor® (inklusive Jobrechner und Elektromotor zur Düngersteuerung) bewegen.

Im Offlineansatz ist sowohl für die eigene Datenerfassung als auch für die spätere Umsetzung des Maschinenauftrags ein satellitengestütztes Positionierungssystem Voraussetzung. Für entsprechende Empfangsgeräte müssen Kosten in Höhe von 1 000 bis 8 000 Euro veranschlagt werden, wobei Geräte mit höherem Preis i. d. R. eine höhere Ortungsgenauigkeit erreichen. Auch bei den Korrektursignalen gibt es große Unterschiede hinsichtlich der Genauigkeit und der Kosten: Letztere belaufen sich für den Decoder auf 700 bis 2 500 Euro, zusätzlich fallen regelmäßig Lizenzkosten von bis zu 800 Euro/Jahr an (geostationäre Satelliten). Einige Referenzsignalangebote sind allerdings kostenlos verfügbar.

Datenmanagement- und Beratungssysteme spielen v. a. im Offlineansatz eine wichtige Rolle, da bei Onlineverfahren grundsätzlich auf die Verortung und Speicherung von Daten verzichtet werden kann. Geeignet sind Geoinformationssysteme, die zu Preisen von 600 bis 2 000 Euro angeboten werden, wobei meist zusätzliche Supportkosten anfallen, die pro Jahr 10 bis 20 Prozent des Anschaffungspreises betragen können. Die erforderliche Hardware, bestehend aus dem Betriebsrechner, dem Bordcomputer auf der Maschine sowie Jobrechnern auf den Geräten, ist mittlerweile weit verbreitet bzw. gehört meist zur Serienausstattung. Schließlich ist für die Applikationstechnik – d. h. PA-taugliche Drillmaschinen, Düngerstreuer und Feldspritzen – mit Kosten von meist mehreren tausend Euro zu rechnen. Im Bereich der Navigationstechnik fallen relativ hohe Investitionskosten an, für automatische Lenksysteme z. B. von rund 15 000 bis 25 000 Euro. Letztere sind keine Voraussetzung für die Teilflächenbewirtschaftung, können aber bedeutende arbeitswirtschaftliche und ökonomische Vorteile erbringen.

Der Nutzen von PA-Verfahren in Form von Betriebsmitteleinsparungen und Mehrerträgen lässt sich auf Grundlage der vorliegenden Untersuchungen nur grob abschätzen. Die zu erwartenden Effekte sind dabei je nach Bewirtschaftungsschritt unterschiedlich: Bei der Bodenbearbeitung scheinen durch eine teilflächenspezifische Reduktion der Bearbeitungstiefe deutliche Einsparungen beim Kraftstoffbedarf erreichbar zu sein. Allerdings ist die Datengrundlage hierzu bislang sehr schwach. Auch zur Variation der Saatstärke liegen bislang nur wenige Untersuchungen vor. Tendenziell lassen sich hier positive Effekte (gleicher Ertrag bei reduzierter Saatstärke) bei Reihenfrüchten bzw. Kulturarten, die sich nicht bestocken (z. B. Mais), beobachten. Im Bereich der Grunddüngung und Kalkung wird nicht mit nennenswerten Ertragseffekten gerechnet. Einsparungen beim Düngereinsatz sind möglich; allerdings zeigen die Untersuchungsergebnisse hierzu bislang keine einheitlichen Ergebnisse.

Durch eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung lassen sich sowohl mit Offline- als auch mit Onlineverfahren tendenziell deutliche Düngereinsparungen bei gleich bleibenden oder höheren Erträgen erreichen. Auch im Pflanzenschutz wird von positiven Ergebnissen berichtet: Bei der Ausbringung von Herbiziden konnten in einer größeren Anzahl von Versuchen häufig 50 Prozent (bei einer Spannbreite von 10 bis 90 Prozent) der Aufwandmenge eingespart werden. Auch bei der Fungizidapplikation mit dem CROP-Meter scheinen Einsparungen in der Größenordnung von 10 bis 20 Prozent realisierbar, ähnliches dürfte für die Ausbringung von Wachstumsreglern gelten. Bei der automatischen Spurführung kann davon ausgegangen werden, dass durch Reduktion von Überlappungen bei der Dünger- und Wirkstoffapplikation deutliche Einsparungen von Betriebsmitteln möglich sind.

Modellrechnungen zum Einsatz teilflächenspezifischer Verfahren bei der Grunddüngung mit Phosphat und Kalium, der Stickstoffdüngung, der Herbizidapplikation und der Ausbringung von Wachstumsreglern in Winterweizen haben gezeigt, dass in den meisten Fällen eine Wirtschaftlichkeit des Verfahrens erst bei nennenswerten Betriebsmitteleinsparungen oder stark reduzierten Preisen für die PA-Technik (oder die Datenerfassung) und auch dann nur bei großen Betrieben mit mehreren Hundert Hektar Betriebsfläche möglich ist.

Die Akzeptanz ist für die verschiedenen PA-Anwendungen unterschiedlich und abhängig von der Betriebsgröße,

dem Betriebstyp und den Standortverhältnissen. Darüber hinaus wird sie immer auch durch die Einstellung des Betriebsleiters, d. h. seine persönliche Wahrnehmung und individuelle Abwägung und Gewichtung möglicher Risiken bzw. Gewinnchancen bei den einzelnen PA-Anwendungen beeinflusst. Die in der Praxis hauptsächlich eingesetzten PA-Verfahren sind die Flächenvermessung, die Bodenbeprobung und die Ertragskartierung. Im Gegensatz dazu werden PA-Verfahren, die die gewonnenen Informationen in teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen umsetzen (z. B. die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung), von deutlich weniger PA-Nutzern eingesetzt. Spurführungssysteme auf der Grundlage satellitengestützer Ortungssysteme, die es erst seit relativ kurzer Zeit auf dem Markt gibt, werden aber bereits von jedem vierten PA-Nutzer (bei den Lohnunternehmern ist es jeder zweite PA-Anwender) genutzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese leicht handhabbar sind und auch ohne weitere Anwendung von PA eingesetzt werden können.

PA wird insbesondere von jungen, gut ausgebildeten Landwirten mit überdurchschnittlich großer Flächenausstattung sowie in betriebsübergreifenden Bewirtschaftungsformen (z. B. Lohnunternehmer) eingesetzt. Die durchschnittliche Betriebsgröße von PA-Nutzern liegt zwischen 1 080 ha (2001) und 904 ha (2005). Diejenigen Landwirte, die PA einsetzen, geben v. a. deutlich bessere Kenntnisse über ihre Produktionsstandorte und dadurch erlangte größere Entscheidungssicherheit sowie ökonomische Motive als Einstiegsgründe an; allerdings erwarten die meisten Gewinnsteigerungen erst nach einer Einarbeitungs- und Anwendungsphase von fünf bis zehn Jahren. Die Möglichkeit der umfassenden Dokumentation der durchgeführten Maßnahmen wird zunehmend als Grund für einen Einstieg in PA genannt.

Die Betriebsgröße ist nicht nur ein wichtiger Faktor, der die Wirtschaftlichkeit bestimmt, sondern auch ein wesentlicher Grund dafür, dass die Diffusion von PA im Allgemeinen und insbesondere in Regionen mit klein parzellierten Agrarstrukturen bislang deutlich hinter den Erwartungen zurückbleibt. Neben allgemeinen Wissensdefiziten und Vorbehalten, fehlenden soliden und unabhängigen Praxisempfehlungen und der vergleichsweise hohen Unsicherheit bei der Übertragung von in Exaktversuchen erzielten Effekte von PA auf die betriebliche Praxis führen gerade auch die unzureichende praxisrelevante Kenntnis über Kosten und Nutzen von PA-Techniken dazu, dass von einem Einsatz grundsätzlich abgesehen wird. Weitere Akzeptanzhemmnisse sind fehlende technische Normen bei Geräteschnittstellen, Bedenken bezüglich der Funktionalität und Zuverlässigkeit der Technik (Stichwort: Kinderkrankheiten) und Befürchtungen hinsichtlich der ausreichenden Unterstützung bei der Implementierung von PA und des Zeitbedarfs für die Einarbeitung, Managementaufgaben und Weiterbildung.

Ein zusätzliches Hindernis bei der Diffusion von PA sind die schwierigen ökonomischen Rahmenbedingungen, die erstens kein günstiges Klima für Neuinvestitionen schaffen und zweitens dazu führen, dass bei Neuanschaffungen die Wahl zuerst auf solche Verfahren und Techniken fällt, mit denen eine wirtschaftlichere (d. h. rasch kostensenkende) Produktion bei möglichst geringem Arbeitsaufwand möglich ist. PA ist dagegen eher eine Technik mit einem einerseits zusätzlichen Kapitalbedarf und andererseits schwer abschätzbaren Einsparungen oder Mehrerträgen. Sie erfordert zudem ein gutes informationstechnisches Verständnis sowie einen höheren Managementaufwand in der Einarbeitungsphase (v. a. bei Datenverarbeitung und Gerätesteuerung).

V. Ökologische Aspekte von Precision Agriculture

Auf einem beträchtlichen Teil der Landesfläche erfolgen durch landwirtschaftliches Handeln Eingriffe in den Naturhaushalt, deren Effekte zum Teil erwünscht sind (etwa das Schaffen einer offenen, strukturreichen Landschaft), zum Teil jedoch zu beträchtlichen negativen Auswirkungen auf Umwelt und Natur führen.[22] Schon seit Beginn der Entwicklung von PA Anfang der 1990er Jahre versprechen sich verschiedene Akteure günstige Umwelteffekte von einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Vergleich zu flächeneinheitlichen Produktionsverfahren. Umfangreiche Studien zu den Umweltwirkungen eines PA-Einsatzes werden allerdings erst seit Ende der 1990er Jahre durchgeführt (Strecker et al. 2004b, S. 31). Die positiven Erwartungen basieren in erster Linie darauf, dass durch PA-Technologien erstmals eine Ausbringung von Dünger oder Pflanzenschutzmitteln möglich wird, die kleinräumig – d. h. für Teilflächen eines Feldes – optimal an die Standortverhältnisse und den Pflanzenbestand angepasst ist. Neben der Einsparung von Betriebsmitteln werden mittlerweile auch Einsatzmöglichkeiten von PA beim Resistenzmanagement und bei der Berücksichtigung von Arten- und Biotopschutzzielen diskutiert. Im Folgenden werden zunächst die Umweltentlastungspotenziale abgeschätzt, die als Folge der Nutzung von PA-Technologien bei verschiedenen Bewirtschaftungsmaßnahmen auftreten können. Anschließend wird die Eignung von PA zum Resistenzmanagement und zur Integration von Arten- und Biotopschutzzielen diskutiert.

1. Umweltentlastungspotenziale

Vom landwirtschaftlichen Betriebsmitteleinsatz können verschiedene unerwünschte Umwelteffekte ausgehen: Dazu zählen beispielsweise die Verunreinigung von Grundwasser mit Nitrat und Rückständen von Pflanzenschutzmitteln, die Eutrophierung von Oberflächengewässern und der Rückgang der Vielfalt wildlebender Tier- und Pflanzenarten. Darüber hinaus sind noch Nebeneffekte im Zusammenhang mit der Bereitstellung und Nutzung der Betriebsmittel zu verzeichnen (z. B. der Energiebedarf zu Herstellung von Stickstoffdünger sowie Klimagasemissionen bei der Düngerausbringung), die im Folgenden jedoch nicht berücksichtigt werden.

---

[22] Dieses Kapitel basiert zum Teil auf den Gutachten von Strecker et al. (2004b) und Werner/Christen (2004).

Die Abschätzung der ökologischen Wirkungen von PA ist mit einer Reihe von Schwierigkeiten verbunden. Hierzu gehören die Komplexität der Beziehungen zwischen landwirtschaftlichen Maßnahmen und den Wirkungen auf Natur und Umwelt (Komplexitätsproblem), die Verallgemeinerung der Ergebnisse und Aussagen zu den Umwelteffekten von PA (Verallgemeinerungsproblem), die hinter den Erwartungen zurückbleibende Diffusion von PA (Diffusionsproblem) und die Bewertung der mit PA erzielten Umweltvorteile im Vergleich zu alternativen Verfahren und Techniken der Landbewirtschaftung (Bewertungsproblem).

– Nur in Ausnahmefällen kann unmittelbar vom Betriebsmitteleinsatz bzw. seiner Reduktion auf die ökologischen Wirkungen geschlossen werden. Dies gilt beispielsweise für den reduzierten Treibstoffbedarf des Schleppers bei einer durch PA differenzierten Bodenbearbeitung. In der Regel sind die Umweltwirkungen neben der Aufwandmenge von zahlreichen weiteren Faktoren abhängig. Beispielsweise wird der düngungsbedingt mögliche Nitrateintrag in tiefere Bodenschichten und ins Grundwasser u. a. davon beeinflusst, wie die Stickstoffdynamik im Boden abläuft, welche Bindungsfähigkeit für Stickstoff der Boden aufweist und welche Auswaschungsgefährdung infolge von Niederschlägen besteht. Die Umweltwirkungen sind somit i. d. R. in hohem Maße standort- und witterungsabhängig.

– Auch wenn aussagekräftige Versuchsergebnisse über Umweltwirkungen von PA-Verfahren vorliegen, bleibt die Frage, ob die differenzierten, kultur- und standortspezifischen Ergebnisse repräsentativ sind. Es besteht also eine Ungewissheit darüber, ob von in einzelnen Versuchen mit bestimmten Kulturen und an speziellen Standorten festgestellten Wirkungen auf die Effekte bei einem großflächigen Einsatz von PA an verschiedenen Standorten geschlossen werden kann.

– Umweltentlastungspotenziale von PA werden sich nur insoweit realisieren lassen, wie PA auch in der Landwirtschaft angewendet wird. Umfang und Geschwindigkeit der PA-Diffusion in die landwirtschaftliche Praxis können derzeit aber nur schwer abgeschätzt werden. Bislang bleibt der Anwendungsgrad hinter den Erwartungen zurück. Die Umweltwirkungen der Landbewirtschaftung hängen außerdem bekanntermaßen nicht nur von der Intensität der Produktionsverfahren und den Standortbedingungen ab, sondern werden auch wesentlich von der Qualität des Betriebsmanagements beeinflusst. Deshalb ist zu fragen, ob durch PA nur diejenigen Landwirte, die bereits nach den Regeln der guten fachlichen Praxis wirtschaften, lediglich noch etwas umweltfreundlicher produzieren, oder ob PA von allen Landwirten (z. B. auch von Nebenerwerbslandwirten) genutzt wird und es so zu einer deutlichen allgemeinen Verbesserung der Umweltbilanz kommt.

– Die Beurteilung von Umwelteffekten wird entscheidend dadurch geprägt, mit welchem Produktionsverfahren PA verglichen wird. In den vorliegenden Untersuchungen werden PA-Verfahren durchweg mit flächeneinheitlichen Varianten der gleichen Bewirtschaftungsintensität verglichen. Eine andere Bewertung würde sich ergeben, wenn extensivere Nutzungssysteme oder der ökologische Landbau als Vergleichsmaßstab herangezogen werden. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass bestimmte PA-Techniken auch im Ökolandbau eingesetzt werden könnten.

Teilflächenspezifische Bodenbearbeitung

Das Umweltentlastungspotenzial einer differenzierten Bodenbearbeitung liegt in erster Linie in der Einsparung von Kraftstoff. Bei Versuchen im Rahmen des BMBF-Ver-bundprojekts preagro konnte durch eine teilflächenspezifische Anpassung der Bearbeitungstiefe von tief auf flach der Dieselverbrauch in zwei Messfahrten von 24,0 bzw. 25,1 l/ha auf 10,6 bzw. 12 l/ha mehr als halbiert werden (Sommer/Voßhenrich 2002, S. 237). Neben einer deutlichen Reduktion des Verbrauchs der nicht erneuerbaren Ressource Erdöl können damit auch CO_2-Emissionen vermieden werden.

Das Ausmaß der Kraftstoffeinsparungen durch Anpassung der Bearbeitungstiefe hängt im Wesentlichen vom Anteil der Bereiche an der Gesamtfläche ab, die lediglich einer flachen Bearbeitung bedürfen. Dabei handelt es sich bei dem im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts preagro verwendeten Algorithmus um Standorte, die weder Vernässungserscheinungen noch hohe Sandanteile aufweisen und die sich nicht an stark ausgeprägten Senken oder Kuppen befinden. Die derzeitige Datenlage erlaubt es nicht, eine quantitative Einschätzung des Einsparpotenzials an Kraftstoff auf Betriebsebene zu geben. Es ist jedoch anzunehmen, dass dieses bedeutsam ist. Auch indirekt könnten von einer kleinräumig angepassten Bodenbearbeitung positive Umwelteffekte ausgehen: Es werden Vorteile im Hinblick auf die Aggregatstabilität des Oberbodens, die biologische Aktivität sowie die Humus- und Nährstoffanreicherung diskutiert (Epperlein/Metz 2003, nach Strecker et al. 2004b, S. 40); diese sind jedoch als eher gering einzuschätzen.

Teilflächenspezifische Aussaat

Die vorliegenden Untersuchungen auf dem Gebiet der differenzierten Aussaat befassen sich nur am Rande mit ökologischen Effekten. Sie deuten darauf hin, dass durch eine teilflächenspezifische Aussaat eine Reduktion der Saatgutmenge bei gleichen Erträgen (Schmerler et al. 2001) bzw. Ertragssteigerungen bei angepasster Saatstärke (Maidl et al. 2000) zu erreichen sind. Einsparungen bei der ausgebrachten Saatgutmenge können zu verringerten Umweltbelastungen bei der Saatgutproduktion infolge eines reduzierten Bedarfs an chemischen Beizmitteln sowie an Fläche, Dünge- und Pflanzenschutzmitteln führen. Die zu erwartenden positiven Umweltwirkungen sind jedoch als eher gering einzuschätzen.

Teilflächenspezifische Grunddüngung

Es wird davon ausgegangen, dass eine differenzierte Grunddüngung nicht zu nennenswerten Ertragsveränderungen führen wird. Allerdings könnte eine Reduktion der für einen definierten Ertrag ausgebrachten Düngermenge dazu führen, dass Umweltbelastungen durch die Düngerherstellung und die Anwendung (z. B. Eutrophierung von Oberflächengewässern bei Erosion von Boden mit hohen Phosphatgehalten) reduziert werden. Zudem handelt es sich bei den Rohstoffen der Phosphatdüngerherstellung um nicht erneuerbare Ressourcen, deren Erschöpfung bei Fortschreibung des gegenwärtigen Verbrauchs (und bei einem Anstieg des Phosphatverbrauchs der Entwicklungsländer) bereits in rund 100 Jahren zu befürchten ist (Kap. VI.3). Die Datenlage zu Umwelteffekten einer teilflächenspezifischen Grunddüngung ist insgesamt jedoch sehr spärlich. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die kleinräumige Anpassung an die Standortverhältnisse und die Bedürfnisse der Pflanzen insgesamt auch eine Steigerung der Düngermenge bedeuten kann, d. h. dass mit positiven Umwelteffekten aus reduzierten Aufwandmengen nicht in jedem Fall gerechnet werden kann.

Teilflächenspezifische Stickstoffdüngung

Die Erwartung an eine differenzierte mineralische Stickstoffdüngung, mit reduzierten Düngermengen gleiche Erträge bzw. bei im Mittel annähernd gleicher Düngermenge höhere Erträge zu erzielen, hat sich im größeren Teil der vorliegenden Untersuchungen bestätigt (Kap. IV.3). Die Einsparungen bewegen sich dabei in der Größenordnung von 14 kg N/ha bzw. 7 Prozent der N-Düngung bei einem um bis zu 6 Prozent höheren Ertrag. Einige Versuche zeigten jedoch höhere Düngermengen bei teilflächenspezifischer Ausbringung, z. T. verbunden mit höheren Erträgen, oder aber keinen positiven Effekt auf die Relation zwischen Düngermenge und Ertrag. Grundsätzlich hängt das Einsparpotenzial davon ab, welcher Anteil der Ackerfläche bei einheitlicher Düngung eine Über- bzw. Unterversorgung mit Stickstoff erfahren würde. Überwiegt die Summe der unterversorgten Teilflächen die Summe der Bereiche mit Überversorgung, so ist mit einer Zunahme der ausgebrachten Menge durch differenzierte Düngung zu rechnen, allerdings in der Erwartung entsprechend höherer Erträge und Stickstoffentzüge.

Wesentlichen Einfluss auf das Einsparpotenzial besitzt auch der verwendete Düngealgorithmus. Dabei wird versucht, mit Hilfe einer Produktionsfunktionsanalyse unter Verwendung zusätzlicher ortsspezifischer Daten ex ante ein teilflächenspezifisches Optimum für die Stickstoffdüngung zu berechnen. Da dem Landwirt zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung der Verlauf der Produktionsfunktion nicht bekannt ist, trifft er die Entscheidung über die Bemessung der Düngermenge unter Unsicherheit. Die Düngermenge liegt bei risikoaversen, aber auch bei risikoneutralen Landwirten oftmals über dem ökonomischen Optimum, was u. a. auf das Faktor-Produktpreis-Verhältnis zurückgeführt wird (Babcock 1992, nach Strecker et al. 2004b, S. 34). Die bessere Datenlage bei Verwendung von PA könnte dazu führen, dass z. B. bei der Bemessung von Stickstoffdüngermengen auf Risikozuschläge verzichtet wird bzw. diese geringer ausfallen (Strecker et al. 2004b, S. 63).

Die Reduzierung der ausgebrachten Düngermenge – absolut oder in Relation zum Ertrag – ist im Hinblick auf Umweltschutzziele an sich wünschenswert, insbesondere aufgrund des relativ hohen Energiebedarfs bei der Herstellung von Stickstoffdüngemitteln sowie auch wegen der sonstigen mit der Herstellung und Ausbringung verbundenen negativen Umweltwirkungen, etwa Emissionen des Treibhausgases N_2O aus dem ausgebrachten Mineraldünger. Allerdings gehen von Stickstoffdüngemitteln noch weitere negative Umweltwirkungen aus, die nicht mit Mengenangaben allein beurteilt werden können. Dazu zählt insbesondere der Austrag von Nitrat in tiefere Bodenschichten bzw. sein Eintrag ins Grundwasser, der wesentlich von – kleinräumig variablen – Bodenparametern und dem Niederschlag abhängt. Aus diesem Grund ist die Angabe eines Stickstoffbilanzsaldos für das gesamte Feld – häufig als Maß für die Umweltbelastung durch Stickstoffdünger verwendet – als Indikator für die Grundwassergefährdung nur bedingt geeignet. Besser geeignet sind Daten zur Stickstoffeffizienz für Teilflächen, da hierbei zumindest der Stickstoffentzug durch die Kulturpflanzen dem pflanzenverfügbaren Stickstoff im Boden gegenübergestellt werden kann, wenngleich auch hier weder die Rückhaltefähigkeit des Bodens für Stickstoff noch die Sickerwassermenge berücksichtigt werden.

Auf dem Versuchsgut Scheyern konnte durch PA eine Erhöhung der Stickstoffeffizienz bei Winterweizen um 3 bzw. 4 Prozent erreicht werden. Schmerler et al. (2001) berichten sogar von einer Verbesserung der Stickstoffeffizienzen um 10 bis 15 Prozent. Auch Wenkel et al. (2002) konnten in ihren Versuchen eine Erhöhung der N-Effizienz nachweisen. Die direkte und flächenhafte Messung von Nitrateintrag in das Grundwasser ist aus praktischen Gründen nicht durchführbar (Strecker et al. 2004b, S. 47). Reiche et al. (2002) ermittelten in einer Szenariorechnung mit einem validierten N-Austragsmodell für unterschiedliche Anbauregionen eine Reduzierung der Stickstoffverluste durch Sickerwasseraustrag um ca. 5 Prozent bzw. rund 10 kg (Spanne: 8 bis 12 kg) Nitratstickstoff/ha/Jahr (Weizen) bei gleicher Gesamtdüngermenge jeweils für 30-jährige Simulationszeiträume. Kersebaum/Lorenz (2002) hingegen konnten bei messenden Untersuchungen in Einzeljahren keine Reduktion der Nitratauswaschung ermitteln. Eine mögliche Erklärung besteht ihrer Ansicht nach darin, dass die Felder überoptimal mit Stickstoff versorgt waren.

Ein möglicher Vorteil von PA-gestützter Düngemittelausbringung ist die gezielte Berücksichtigung von Umweltschutzvorgaben: So könnten beispielsweise Teilbereiche von Äckern von einer (intensiven) Stickstoffdüngung ausgeschlossen werden, wenn die Gefahr der Nitratauswaschung auf Grund der lokalen Standortparameter einen tolerablen Wert zu überschreiten droht.

Teilflächenspezifischer Pflanzenschutz

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass durch eine differenzierte Applikation von Pflanzenschutzmitteln die ausgebrachte Menge – insbesondere bei Herbiziden – z. T. erheblich reduziert werden kann. Die daraus resultierenden positiven Umwelteffekte beziehen sich weniger auf verringerte Umweltbelastungen bei der Herstellung der Präparate als vielmehr auf eine Verminderung der unerwünschten Wirkungen von Pflanzenschutzmitteln in der Umwelt. So kann davon ausgegangen werden, dass die Belastung des Bodens mit Wirkstoffen und deren Abbauprodukten verringert werden kann. Gleiches gilt für das Grundwasser und Oberflächengewässer, die durch Einträge von Sickerwasser sowie von erodiertem Boden mit Pflanzenschutzmittelrückständen belastet werden können. Schließlich ist auch mit einer verringerten Belastung der Kulturpflanzen selbst sowie der aus ihnen hergestellten Lebensmittel zu rechnen.

Eine Reduzierung der Applikationsmengen von Pflanzenschutzmitteln durch PA könnte zudem positive Naturschutzeffekte zur Folge haben. So wird angenommen, dass auf nicht behandelten Teilflächen seltene Ackerwildkräuter gefördert und infolgedessen die Lebensbedingungen der Fauna verbessert werden können. Eine Untersuchung der ökologischen Effekte einer teilflächenspezifischen Herbizidapplikation konnte allerdings bei einer insgesamt erheblich reduzierten Herbizidaufwandmenge keine signifikanten Veränderungen bei Organismen der Bodenfauna feststellen (Zuk et al. 2003). Nach Reiche et al. (2002, S. 266) ist davon auszugehen, dass „signifikante Auswirkungen, d. h. ein Erreichen des Naturschutzziels, mit hoher Wahrscheinlichkeit eine ganz erhebliche Modifizierung – im Fall der Herbizidausbringungen die Nullvariante – der landwirtschaftlichen Maßnahmen erfordern“. Grundsätzlich ist der Nachweis von Naturschutzeffekten als Folge einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung schwierig, da biotische Systeme relativ lange Reaktionszeiten aufweisen und erst bei wiederholtem Einsatz der betreffenden Verfahren mit Veränderungen zu rechnen ist.

Der Einsatz von PA im Pflanzenschutz eröffnet damit neue Perspektiven einer kontrollierten und dokumentierbaren Anwendung von Pflanzenschutzmitteln; die Risiken von Pflanzenschutzmaßnahmen für Umwelt und Natur können hierdurch besser eingeschätzt und vermindert werden (BBA 2005a). PA erweitert so das Spektrum der Möglichkeiten von Umwelt- und Naturschutzmaßnahmen um ein viel versprechendes Instrument. Allerdings bedarf es entsprechender Anreize, damit die Potenziale von PA zur Verminderung von Umweltbelastungen durch Pflanzenschutzmittel in der Praxis auch ausgeschöpft werden.

2. Resistenzmanagement

Ein noch nicht breiter diskutiertes Anwendungsgebiet von PA könnte in einem besseren Resistenzmanagement im Pflanzenschutz liegen (Werner/Christen 2004, S. 149). Sowohl Unkräuter als auch Schädlinge (z. B. Schadinsekten) können bei wiederholter Anwendung der gleichen Bekämpfungsmaßnahme in relativ kurzer Zeit Resistenzen gegen die Maßnahme ausbilden. Dies führt dazu, dass zur Gewährleistung des Bekämpfungserfolgs die Dosis erhöht oder auf andere Wirkstoffe zurückgegriffen werden muss. Die Ausbildung von Resistenzen wird durch mehrere Faktoren begünstigt: die große räumliche Verbreitung des Anbaus einiger weniger Kulturpflanzen, die hohe Populationsdichte der Schadorganismen, ihre enge Generationsfolge sowie eine nur begrenzte Anzahl von Angriffspunkten für die Bekämpfungstechniken in der Physiologie der Organismen. Es ist daher erforderlich, bei allen entsprechenden Regulierungsmaßnahmen geeignete Vorkehrungen zu treffen, die das Risiko der Resistenzausbildung verringern. Dazu gehören ein regelmäßiger Wechsel der auf einem Feld ausgebrachten Wirkstoffe sowie die Beschränkung des Mitteleinsatzes auf Fälle akuten Befalls. Darüber hinaus ist es hilfreich, Teilbereiche der Fläche unbehandelt zu lassen, da sich dort solche Organismen halten können, die empfindlich auf die Behandlungsmaßnahmen reagieren; diese erhalten im Zuge der Reproduktion sozusagen die Angreifbarkeit der gesamten Population. Die genannten Maßnahmen sind bereits Teil der guten fachlichen Praxis zum Pflanzenschutz. Nach Werner/Christen (2004, S. 150) könnte die Wirksamkeit einiger dieser Strategien zum Resistenzmanagement dadurch verbessert werden, dass sie innerhalb der Felder nach epidemiologischen Kriterien räumlich differenziert angewandt werden; zudem könnte hierdurch die einfache Dokumentation der durchgeführten Maßnahmen gewährleistet werden.

3. Integration von Arten- und Biotopschutzzielen

Zum Arten- und Biotopschutz werden teilweise landwirtschaftliche Nutzungsrechte eingeschränkt, Schutzgebiete ausgewiesen oder Biotope gezielt gepflegt und entwickelt. Die Konzentration auf Schutzgebiete wird jedoch vielfach als unzureichend kritisiert (SRU 2000). In den letzten zehn Jahren wurden vermehrt Forschungsanstrengungen unternommen, um eine generelle Integration von Naturschutzzielen in die Landbewirtschaftung sicherzustellen. Das Potenzial von PA-Verfahren zur Erreichung bzw. Sicherstellung von Zielen des Arten- und Biotopschutzes ist bisher kaum untersucht worden. Potenziell könnte PA in drei Einsatzgebieten genutzt werden (Strecker et al. 2004b, S. 68): Die Sicherstellung des Schutzes kleinräumiger Biotope in der Agrarlandschaft durch teilflächenspezifische Nutzungsauflagen, die Berücksichtigung spezieller Habitatansprüche sowie die Sicherstellung der Einhaltung von Auflagen bzw. der Erbringung von Leistungen für den Arten- und Biotopschutz.

Mit PA-Verfahren können sensible Bereiche bei der Ausbringung von Betriebsmitteln – etwa durch Sicherstellung von Abstandsauflagen (UBA 2003a) – geschützt werden. So kann die PA-gesteuerte Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln den Landwirt bei der Beachtung der unterschiedlichen Abstandsregelungen – die Mindestabstände zu angrenzenden Biotopen sind mittelspezifisch und variieren in einem Bereich von 10 bis über 100 m – unterstützen und ihm helfen, seine gesetzlich vorgeschriebenen Dokumentationspflicht zu erfüllen und bei

Kontrollen nachzuweisen, dass er die Abstandsauflagen eingehalten hat.

Schutz kleinräumiger Biotope

In der Agrarlandschaft sind vielfach kleinräumige Biotope zu finden, die als erhaltens- bzw. schützenswert eingestuft werden. Dazu zählen beispielsweise ausgehagerte Kuppen und feuchte Senken. Zu ihrem Schutz muss u. a. gewährleistet werden, dass bestimmte Stoffeinträge (insbesondere von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln) minimiert bzw. verhindert werden. Es könnten die entsprechenden Flächen mit Hilfe von GIS modelliert und somit im Hinblick auf den Biotopschutz sensible Bereiche identifiziert werden. In den meisten Bundesländern liegen zudem digitale Kartenwerke vor, in denen schutzwürdige Biotope verzeichnet sind. Durch den Einsatz von PA könnten somit z. B. Abstandsauflagen oder sonstige Restriktionen für bestimmte Bewirtschaftungsmaßnahmen umgesetzt und dokumentiert werden. Untersuchungen der Biologischen Bundesanstalt zeigen, dass dies technisch möglich ist (Gutsche et al. 2004, nach Strecker et al. 2004b, S. 68 f.).

Berücksichtigung spezieller Habitatansprüche

Die Agrarlandschaft ist Lebensraum zahlreicher wildlebender Tier- und Pflanzenarten, darunter auch vieler gefährdeter Arten. Sie sind an die Besonderheiten der Kulturlandschaften angepasst und auf ihre Charakteristika – das Offenhalten der Flächen sowie den Wechsel der Bodenbedeckung durch landwirtschaftliche Aktivitäten – angewiesen. Der Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln sowie von agrartechnischen Maschinen und Geräten kann jedoch eine erhebliche Gefahr für solche Arten darstellen. So ist von Amphibien bekannt, dass sie zu bestimmten Zeiten für ihre Wanderungen von Teilhabitat zu Teilhabitat landwirtschaftliche Flächen auf relativ stabilen Korridoren überqueren. Während dieser verhältnismäßig kurzen Zeitspanne sind die Tiere den durchgeführten landwirtschaftlichen Maßnahmen ausgesetzt, durch die sie – insbesondere im Falle des Pflügens oder der Stickstoffdüngung mit Kalkammonsalpeter – stark beeinträchtigt werden können. Mit Hilfe von PA-Technologien könnten solche Wanderkorridore nach ihrer Kartierung zu den betreffenden Zeiten von einer Behandlung ausgenommen werden (Plachter/Janßen 2002). Bei vielen anderen Wirbeltieren hingegen ist ein entsprechender Schutz durch PA nur schwierig zu realisieren, da diese weniger ortsstabile Bewegungsmuster aufweisen.

Während die Berücksichtigung räumlicher Habitatansprüche mit PA-Technologien vergleichsweise gut untersucht ist, gibt es nur wenige Untersuchungen, die eine mögliche Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik der Ansprüche verschiedener Tierarten zum Gegenstand haben. Meyer-Aurich (2001) zeigte, wie pflanzenbauliche Anbauverfahren an temporäre Habitatansprüche verschiedener Tierarten angepasst werden können. Allerdings fehlen bisher Instrumente, die den Landwirten zeigen könnten, wann und wo sich welche Tierarten in ackerbaulich genutzten Flächen aufhalten und welchen Schutz sie benötigen. Nach Einschätzung von Strecker et al. (2004b, S. 69) könnten PA-Technologien durch ausgefeilte Informationssysteme Landwirte bei der operationalen Planung von pflanzenbaulichen Maßnahmen solche Hinweise auf temporäre Habitatansprüche geben.

4. Fazit

Die Abschätzung der ökologischen Wirkungen von PA ist schwierig: erstens aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen landwirtschaftlichen Maßnahmen und messbaren Umweltreaktionen. Zweitens ist es auf der Basis weniger verfügbarer Daten zu Standortheterogenitäten und Effekten von PA nicht möglich, die Ergebnisse und Aussagen zu den Umwelteffekten von PA zu verallgemeinern. Drittens ist zu bedenken, dass die möglichen Erfolge von PA mit der Diffusion der Technik in der Landwirtschaft zusammenhängen, diese bislang aber stark hinter den Erwartungen zurückbleibt. Viertens und letztens hängt die Einordnung der mit PA erzielbaren Umweltvorteile damit zusammen, mit welchem Produktionsverfahren PA verglichen wird, d. h. ob eine intensive flächeneinheitliche Bewirtschaftung oder extensive Nutzungssysteme, wie die konservierende Bodenbearbeitung, als Vergleichsmaßstab herangezogen werden, wobei extensive Nutzungssysteme zu einem gewissen Teil ebenfalls mit PA-Techniken durchgeführt werden könnten. Aus diesem Grund können nur tendenzielle Aussagen zu den ökologischen Wirkungen von PA-Anwendungen gemacht werden.

Ökologisch positive Effekte können durch verschiedene PA-Anwendungen erzielt werden. Mit der differenzierten mineralischen Stickstoffdüngung kann der Mineraldüngeraufwand auf heterogenen Feldern im Durchschnitt um etwa 14 kg N/ha (entspricht ca. 7 Prozent der N-Düngung) reduziert werden, bei um bis zu 6 Prozent höheren Erträgen. Darüber hinaus kann durch teilflächenspezifische Stickstoffdüngung die Stickstoffeffizienz um einige Prozentpunkte erhöht werden. Auch durch die teilflächenspezifische Bodenbearbeitung und Aussaat können – insbesondere durch eine Verringerung des Treibstoff- und Saatgutverbrauchs – positive Umweltauswirkungen erzielt werden. Die derzeitige Datenlage erlaubt es allerdings nicht, hierzu quantitative Einschätzungen zu machen. Während das Einsparpotenzial bei der Bodenbearbeitung je nach Standort bedeutsam sein kann, sind die möglichen Umweltvorteile bei der Aussaat als eher gering einzuschätzen.

Das größte Einsparpotenzial bei der Ausbringung von Betriebsmitteln mit PA liegt in der Applikation von Pflanzenschutzmitteln. Die ausgebrachte Mengen – insbesondere bei Herbiziden – können z. T. erheblich (um bis zu 90 Prozent) verringert und damit auch die mit der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln einhergehenden Risiken für Mensch und Umwelt vermindert werden. Der Einsatz von PA in der Bekämpfung von Unkräutern und Pilzbefall könnte auch zur Verbesserung der Wirksamkeit des Resistenzmanagements beitragen, da hierdurch eine innerhalb der Felder nach epidemiologischen Kriterien räumlich differenzierte Mittelanwendung möglich wäre.

Dieses Anwendungsgebiet für PA ist aber zurzeit weder in der allgemeinen Diskussion um PA noch in der Forschung ein Thema.

Die Effekte PA-bedingter Betriebsmitteleinsparungen auf Natur und Umwelt lassen sich nur mit einem hohen Aufwand und vielfach erst bei Betrachtung längerer Zeiträume und größerer Areale ermitteln (Reiche et al. 2002). Einzelne empirische Untersuchungen sowie modellgestützte Simulations- und Szenarienrechnungen können mögliche Effekte aufzeigen. Wegen der zu berücksichtigenden Standortunterschiede können diese aber nicht bzw. nur bedingt übertragen und verallgemeinert werden.

Grundsätzlich könnten PA-Techniken auch zur Erbringung von Leistungen für den Arten- und Biotopschutz eingesetzt werden, beispielsweise durch das gezielte Aussparen sensibler Bereiche bei der Pflanzenschutzmittelausbringung zum Schutz kleinräumiger schützenswerter Naturvorrangflächen in der Agrarlandschaft, die Berücksichtigung spezieller Habitatansprüche oder die Einhaltung von Nutzungsauflagen. Dieses Nutzungsziel ist bisher allerdings kaum untersucht worden.

VI. Nachhaltigkeitspotenziale von Precision Agriculture

Eine Bewertung von PA hinsichtlich der Erreichung ökologischer, ökonomischer und sozialer Nachhaltigkeitsziele ist schwierig, da zurzeit keine Konzepte oder Methoden zur kohärenten integrativen Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Verfahren und Techniken verfügbar sind[23] und Indikatoren zur Messung nachhaltiger ökonomischer und sozialer Entwicklung in der Landwirtschaft weitestgehend fehlen. Dazu kommt, dass die Datenbasis über die Auswirkungen von PA teilweise sehr dünn ist (Kap. V).

In diesem Kapitel[24] wird gleichwohl versucht, anhand von Plausibilitätsüberlegungen eine Einordnung der Auswirkungen von PA-Anwendungen in den Kontext nachhaltiger Entwicklung vorzunehmen. Hierfür werden die Potenziale von PA zur Verringerung relevanter Nachhaltigkeitsdefizite in der Landwirtschaft systematisch untersucht und diskutiert. Die Analyse konzentriert sich dabei weitestgehend auf umweltrelevante Kenngrößen, zu denen teilweise detaillierte und durch politische Vorgaben verankerte Zielvorstellungen vorliegen. Zu den Auswirkungen von PA auf die ökonomische und soziale Dimension nachhaltiger Entwicklung in der Landwirtschaft können dagegen nur kurze Ausführungen erfolgen, da hier die wissenschaftliche und gesellschaftspolitische Diskussion über Kriterien, Ziele und Indikatoren noch am Anfang steht.

Im Folgenden werden zunächst die Ziele, Strategien und Maßnahmen einer nachhaltigen Landwirtschaft auf der nationalen, europäischen und außereuropäischen Ebene aufgezeigt. Danach werden für ausgewählte außereuropäische Länder (USA, Japan, Australien und Indien) deren nationale Ziele zur Erreichung einer nachhaltigen Landwirtschaft dargestellt und ausgeführt und welche Erwartungen in diesem Kontext an PA geknüpft werden. Hierdurch soll herausgearbeitet werden, dass bei der Operationalisierung des Leitbildes nachhaltiger Entwicklung die nationalen Vorstellungen auch für den Bereich Landwirtschaft sowie auch die Erwartungen an PA auseinander gehen können. Anschließend werden europäische und nationale Nachhaltigkeitsansätze für die Landwirtschaft dargestellt sowie ein Vergleich zwischen den Nachhaltigkeitszielen der betrachteten Länder gezogen. Dabei werden auch die z. T. unterschiedlichen nationalen Erwartungen an PA zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen dargelegt. Danach werden die im wissenschaftlichen und politischen Umfeld diskutierten Nachhaltigkeitsindikatoren vorgestellt. Darauf aufbauend werden die wesentlichen Nachhaltigkeitsdefizite der Landwirtschaft in Deutschland dargestellt und die Beiträge von PA zur Verringerung dieser Defizite analysiert.

1. Ziele einer nachhaltigen Entwicklung in der Landwirtschaft

Globale Ebene

Im Brundtland-Bericht und in der Agenda 21 wird die weltweite Ernährungssicherheit einer wachsenden Weltbevölkerung als wichtiges Ziel einer global nachhaltigen Entwicklung genannt. Zur Erreichung dieses Ziels und um gleichzeitig ein weiteres Vordringen der Landwirtschaft auf nur begrenzt für eine landwirtschaftliche Nutzung geeignete Standorte zu verhindern, soll die Produktion auf bereits bewirtschafteten Flächen gesteigert werden. Im Kapitel 14 der Agenda 21 heißt es dazu: „Vorrang muss dabei die Erhaltung und Steigerung der Leistungsfähigkeit der ertragreicheren landwirtschaftlichen Nutzflächen haben, denn nur so kann eine wachsende Bevölkerung ausreichend mit Nahrungsmitteln versorgt werden“. Hierfür wird der verbesserte Einsatz von Produktionsmitteln (Dünge- und Pflanzenschutzmittel) als bedeutsames Instrument zur Förderung einer nachhaltigen Landwirtschaft und ländlichen Entwicklung („sustainable agriculture and rural development“, SARD) aufgeführt.

Von den Vereinten Nationen (UN) und der „Commission of Sustainable Development“ (CSD) wurden in den letzten Jahren nur wenig Hinweise zum Verständnis und zur Operationalisierung von nachhaltiger Landwirtschaft gegeben. Auf der 3. Sitzungsrunde der CSD (1995) erfolgte eine erste Bestandsaufnahme der Aktivitäten in den verschiedenen Ländern im Bereich nachhaltiger Entwicklung in der Landwirtschaft und des ländlichen Raumes. Da auf der zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Informationsgrundlage keine internationalen Vergleiche gezogen werden konnten, wurden von der CSD auf dieser Sitzung umfassendere nationale Dokumentationen zur nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft anhand von Indikatoren angemahnt.

---

[23] In dem gerade begonnenen BMBF-Forschungsprojekt preagro II soll eine Methode für eine Nachhaltigkeitsbewertung teilflächenspezifischer Bewirtschaftung entwickelt werden.

[24] Dieses Kapitel basiert in weiten Teilen auf dem Gutachten von Werner/Christen (2004).

Auf der 5. Sitzungsrunde der CSD (1997) wurde die Situation in den Entwicklungsländern und die Einführung von Systemen des Integrierten Pflanzenschutzes behandelt. Für die OECD-Länder wird auf die Entwicklung der Anbaufläche des ökologischen Landbaus als Indikator für eine nachhaltige Entwicklung der Landwirtschaft abgehoben. Eine umfassende Auseinandersetzung mit den Prinzipien der nachhaltigen Entwicklung erfolgte allerdings nicht.

Auf der 8. Sitzungsrunde der CSD (2000) wurde als Hauptziel einer nachhaltigen Landwirtschaft und ländlichen Entwicklung die Erhöhung der Nahrungsproduktion und die Verbesserung der Nahrungssicherheit mit umweltfreundlichen Produktionsmethoden genannt. Dies steht in einem gewissen Widerspruch zu dem im Jahr 1997 für die OECD-Länder formulierten Nachhaltigkeitsziel, die nach den Prinzipien des ökologischen Landbaus bewirtschaftete Fläche zu erweitern, da das Ertragspotenzial im Ökolandbau durch den Verzicht auf den Einsatz von Mineraldünger und chemische Pflanzenschutzmittel im Durchschnitt deutlich unter dem der konventionellen Landwirtschaft liegt. Als eine Maßnahme zur Umsetzung des Nachhaltigkeitsleitbildes wird in den Dokumenten die Verbesserung der Düngung erwähnt, ohne dass jedoch konkret auf Einzelmaßnahmen oder Konzepte eingegangen wird.

In der 10. Sitzungsperiode der CSD (2002) gab es Anmerkungen über den Einsatz moderner Technologien als Instrumente einer nachhaltigen Entwicklung in der Landwirtschaft, jedoch bleibt unklar, ob es sich hier um Gentechnik oder PA handelt.

Die „Food and Agriculture Organisation„ (FAO) sieht angesichts der weltweit bis 1,2 Milliarden hungernden Menschen – darunter vor allem Frauen und Kinder – ein wichtiges Ziel nachhaltiger Landbewirtschaftung darin, die Produktion von Nahrungsmitteln in einem Maße anzuheben, dass die gesamte Weltbevölkerung heute und in der Zukunft Zugang zu ausreichend Nahrung hat. Auf dem Welternährungsgipfel in Rom wurde beschlossen (Milleniumsziel), die Zahl der Hungernden weltweit von 1990 bis 2015 zu halbieren. Da die Erdbevölkerung weiter wächst (um rund 1,5 Prozent/Jahr), gleichzeitig weltweit 5 bis 7 Mio. ha an Ackerfläche pro Jahr verloren gehen,[25] ist nach Meinung der FAO zur Sicherstellung einer ausreichenden Nahrungsmittelversorgung eine Erhöhung der Produktivität auf den existierenden guten Ackerbaustandorten erforderlich. Aufgrund der agrarpolitischen Rahmenbedingungen und der niedrigen Preise für landwirtschaftliche Erzeugnisse findet weltweit in vielen Ländern jedoch eine gegenläufige Entwicklung statt: dort verhindern Flächenstilllegungsprogramme und der Trend zur Extensivierung der Produktion – teilweise gefördert durch Agrarumweltprogramme – die Ausschöpfung der standörtlichen, züchterisch-technischen Ertragspotenziale.

[25] Eine Ausdehnung der landwirtschaftlich genutzten Fläche ist nur noch begrenzt möglich und wäre teilweise mit ökologisch bedenklichen Auswirkungen verbunden.

Nachhaltigkeitsziele ausgewählter Länder

Die auf nationaler Ebene festgelegten Ziele einer nachhaltigen Landbewirtschaftung können sich zwischen Industrie- und Entwicklungsländern sowie von den o. g. im globalen Kontext wichtigen Nachhaltigkeitszielen unterscheiden, da diese in besonderem Maße von den naturräumlichen, agrarstrukturellen und politischen Rahmenbedingungen abhängen. Dies soll am Beispiel der Nachhaltigkeitsziele ausgewählter Länder (USA, Japan, Australien und Indien) gezeigt werden. Außerdem wird dargestellt, welche Hoffnungen an PA zur Erreichung einer nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft geknüpft werden.

USA

Vorhaben zur Entwicklung nachhaltiger landwirtschaftlicher Produktionssysteme werden in den USA seit 1987 durch das amerikanische Landwirtschaftsministerium (USDA) gefördert. Im gleichen Jahr bewilligte der Kongress die ersten Finanzmittel für entsprechende Aktivitäten in Forschung und Ausbildung. Ab 1995 wurde ungefähr 1 Prozent des Haushaltes des Forschungsdienstes des USDA für Projekte zur Entwicklung einer nachhaltigen Landwirtschaft ausgegeben.

Ein spezielles Forschungsprogramm für nachhaltige Landwirtschaft wurde 1990 durch die Farm Bill[26] etabliert. In der darauf folgenden Farm Bill (1995) wurden die Ziele einer nachhaltigen Entwicklung der amerikanischen Landwirtschaft definiert:

- Erhalt und Verbesserung der Bodenqualität und -produktivität;
- schonende Nutzung von Boden, Wasser und Energie sowie anderer natürlicher Ressourcen einschließlich von Fischen und Wildtieren;
- Erhalt und Verbesserung der Qualität von Grundwasser und Oberflächengewässern
- Schutz der Gesundheit und Sicherheit von in der Landwirtschaft tätigen Personen;
- Förderung des Wohlbefindens von Tieren;
- Steigerung der Arbeitsmöglichkeiten in der Landwirtschaft.

Die Auflistung umweltrelevanter Nachhaltigkeitsziele darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Verbesserung der wirtschaftlichen Situation der Landwirte und die Förderung von bäuerlichen Strukturen die hauptsächlichen Ziele der Farm Bill[27] sind. Dies zeigt auch die neue Farm Bill 2002, die eine neuartige und höhere Agrarpreisstützung und andere Maßnahmen zur finanziellen

[26] Mittelfristige Planungsgrundlage der US-amerikanischen Agrarpolitik mit einem Schwerpunkt auf wirtschaftliche Zielsetzungen.

[27] Dies ist nicht weiter verwunderlich, da die Farm Bill ihren Schwerpunkt in der ökonomischen Entwicklung hat und die Ausrichtung der Farm Bill durch intensive Lobbyarbeit seitens verschiedener Gruppen von Landwirten beeinflusst wird.

Stützung der Landwirtschaft (und daneben auch erweiterte Umweltmaßnahmen) vorsieht.

Auch in den Programmen und Aktivitäten der Nachhaltigkeitsinitiativen auf regionaler Ebene werden die Verbesserung der wirtschaftlichen Situation der Betriebe und die Entwicklung der ländlichen Räume und Kommunen vorwiegend an erster Stelle genannt. Nachhaltigkeitsziele aus dem Bereich Umwelt- und Ressourcenschutz werden dagegen oft zweitrangig aufgeführt und beschäftigen sich dann mit Aspekten, die den Erhalt der Produktionsgrundlagen betreffen, wie die Erosionsvermeidung, z. B. durch konservierende Bodenbearbeitung („no-till"-Systeme), integrierten Pflanzenschutz und Zwischenfruchtanbau. Daneben gibt es aber auch in den USA Initiativen zur Förderung des ökologischen Landbaus (z. B. Etablierung eines Zertifizierungssystems) und zur verstärkten energetischen Nutzung von Biomasse.

Der Entwicklung und Implementierung neuer Techniken („green technologies") wird in den USA eine große Rolle bei der Erreichung einer nachhaltigeren Landwirtschaft beigemessen. Zu den verschiedenen Verfahren und Techniken, die zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen diskutiert werden – von der konservierenden Bodenbearbeitung über den integrierten Pflanzenschutz und das verbesserte Nährstoffmanagement bis zum ökologischen Landbau – gehört auch der Einsatz von PA. Wie der Beitrag von PA zur nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft insgesamt zu bewerten ist, wird in den USA kontrovers erörtert, da den positiven Nachhaltigkeitseffekten (v. a. Reduzierung des Betriebsmitteleinsatzes) negative (v. a. hoher Kapitalbedarf, Anforderungen an den technischen Sachverstand) gegenüberstehen. Aufgrund fehlender breiter Akzeptanz und beschränkter Diffusion von PA sowie unzureichender Honorierung der mit PA-erzielbaren Umweltleistungen wird der Beitrag von PA zur Verringerung von Nachhaltigkeitsdefiziten zurzeit als eher gering eingeschätzt (Hrubovcak et al. 1999; USDA 2002).

Japan

Die Diskussion zur nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft in Japan ist beachtenswert, da Japan für technische Innovationen als offen gilt und hohe Umweltstandards anlegt. Auf der anderen Seite besitzt Japan eine Landwirtschaft, die extrem kleinteilig strukturiert, arbeitsintensiv, hoch mechanisiert und seitens der Betriebsleiter überaltert (Durchschnittsalter über 60 Jahre) ist. Aufgrund der überwiegend gebirgigen Oberflächengestalt Japans und der starken Nachfrage nach Siedlungsgebieten können nur 14,4 Prozent der Bodenfläche als landwirtschaftliche Anbaufläche genutzt werden. Ertragreiche Reissorten, massiver Düngemittel- und Pflanzenschutzmitteleinsatz sowie intensive Anbautechniken ermöglichen den Kleinbetrieben (durchschnittliche Betriebsgröße: 1,2 ha, meist im Neben- oder Zuerwerb) hohe Ernteerträge. Eine Bedrohung der traditionellen Anbaumethoden in Japan stellen insbesondere die Billigimporte an Lebensmitteln dar. Deshalb verfolgt Japan eine strikte Autarkiepolitik bei der Versorgung des Landes mit wichtigen Grundnahrungsmitteln.

In Japan wurde bereits 1994 vom Landwirtschaftsministerium ein Rat für Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft eingerichtet, in dem unter Beteiligung von Umwelt- und Verbrauchergruppen die Prinzipien und Umsetzungsmöglichkeiten der nachhaltigen Entwicklung in der Landwirtschaft ausgearbeitet wurden. Ein zentrales Nachhaltigkeitsziel in Japan ist die Sicherstellung der Eigenversorgung mit Nahrungsmitteln. Vor diesem Hintergrund wird zum einen ein besonderes Augenmerk auf die Vermeidung weiterer Landverluste durch Versiegelung gelegt. Zum anderen gibt es verschiedene Projekte zur Erhöhung der Produktivität in der Landwirtschaft; hierzu zählt auch die Steigerung der betrieblichen Arbeitsproduktivität durch Verbesserungen der Infrastruktur und Zusammenlegung von Einzelparzellen. Die gesetzgeberische Umsetzung des umfassenden Nachhaltigkeitsansatzes erfolgte 1999.

In der praktischen Umsetzung sollen die Landwirte lernen, natürliche Regelkreise besser zu berücksichtigen, die Nutzung von organischen Düngern zu verbessern und den Gebrauch von Pflanzenschutzmitteln und synthetischen Düngern einzuschränken bzw. effizienter zu gestalten. Zur Erreichung dieser Ziele soll u. a. auch moderne Technik zur präzisen Ausbringung von Betriebsmitteln (z. B. PA) eingesetzt werden. Darüber hinaus soll die Ausbildung und Beratung der Landwirte dahingehend verbessert werden, dass diese die Empfehlungen zum Umgang mit Betriebsmitteln besser umsetzen. Für einen breiten Einsatz von PA zur Verbesserung der Nachhaltigkeit in der japanischen Landwirtschaft müsste eine spezielle Anpassung der Verfahren an die kleinstrukturierten japanischen Verhältnisse erfolgen (Ito 2002).

Australien

Für Australien ist die Diskussion um das Konzept einer nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft in folgendem Kontext zu sehen: Zum einen ist Australien ein wichtiger Exporteur von Agrarprodukten und der Agrarsektor ist im Unterschied zu anderen Industrieländern auch ein volkswirtschaftlich bedeutsamer Sektor. Zum anderen weist die australische Landwirtschaft aufgrund der naturräumlichen Gegebenheiten teilweise große ökologische und in der Konsequenz auch ökonomische Unterschiede auf.

Die australische Regierung hat 1996 ein Konzept zur nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft mit nachstehenden Richtlinien vorgelegt (Guerin 1999; Mason 1997):

- Schaffung einer integrierten Regierungspolitik zur Unterstützung kommunaler Initiativen, die landwirtschaftliche Ressourcen schützen;
- Förderung eines integrierten Ressourcenschutzes im ländlichen Raum, insbesondere in Regionen mit starker Bodendegradation;
- Hilfe bei der Selbstorganisation von kommunalen Initiativen, die den Informationstransfer verbessern und den Landwirten nachhaltige Wirtschaftsweisen näher bringen;

– Verminderung des Einflusses und Verbesserung des Managements von eingeführten Pflanzen und Tieren auf landwirtschaftlichen Nutzflächen;
– Verbesserung des Managements von Kängurubeständen auf nationaler Ebene, einschließlich der Verbesserung der Bedingungen für eine kommerzielle Nutzung von Kängurus;
– Förderung eines sicheren Managements von Pflanzenschutzmitteln und Tierarzneimitteln bei gleichzeitiger Verbesserung des Informationsstands über die genannten Stoffklassen.

Anders als in Westeuropa ist in Australien der Zusammenhang zwischen Ressourcenschutz und Erhalt der Produktionsgrundlage als Basis zur Einkommenserzielung sehr viel direkter. Vor diesem Hintergrund ist es nicht verwunderlich, dass die ökologischen Aspekte der nachhaltigen Entwicklung (Schutz der biotischen und abiotischen Ressourcen, Erhalt und Förderung der Biodiversität) in den Programmen zur nachhaltigen Landwirtschaft überwiegen. Neben einigen naturräumlichen Besonderheiten (Nutzung und Management von Wildtieren und eingeführten Pflanzen und Tieren), wird bei den o. g. Zielen die Bedeutung des partizipatorischen Ansatzes, geprägt durch Umweltinitiativen auf kommunaler Ebene, deutlich: Die direkten staatlichen Initiativen werden durch kommunale Initiativen im Rahmen der „Landcare-Bewegung“, die mit mehr als 4 500 Gruppen inzwischen fast 40 Prozent der landwirtschaftlich genutzten Fläche Australiens erfasst, unterstützt.

Die Erfolge bei der Umgestaltung des Betriebsmanagements gehen einher mit einer wachsenden Bereitschaft zur Teilnahme an Maßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Situation auf den bewirtschafteten Flächen. Ein wesentlicher Grundstein für diesen Erfolg wird in dem sehr stark partizipatorischem „bottom-up“-Charakter des Konzepts und in der Bedeutung der Nachhaltigkeitsinitiativen auf lokaler Ebene gesehen. Entscheidend dabei ist die Veränderung im Bewusstsein der beteiligten Gruppen, die zu einer Umsetzung von Maßnahmen zur nachhaltigen Entwicklung in der Landwirtschaft geführt hat.

In Australien wird PA als eine technische Antwort auf den ökonomischen Druck – bedingt durch sinkende Erzeugerpreise in globalisierten Märkten – und gesellschaftspolitische Forderungen, die Produktion umweltverträglicher zu gestalten, gesehen (Australian Government 2005a). Die Erwartungen an die neue Technik sind hoch: Durch den Einsatz von PA soll die Landbewirtschaftung nachhaltiger werden; gleichzeitig sollen durch die Verbreitung dieser Technik neue Beschäftigungsmöglichkeiten im Verkauf, in der Aus- und Weiterbildung und im „IT-Support“ in ländlichen Räumen geschaffen werden (Australian Government 2005b).

Indien

Ein wesentliches Ziel der indischen Politik besteht in weiteren landwirtschaftlichen Produktionssteigerungen und der Förderung des Agrarbereichs, z. B. durch Zollregelungen. Weitere Schwerpunkte der nachhaltigen Entwicklung sind die Gesetzgebungen und Regelungen zur Saatgutqualität („Seeds Act“ von 1996), zum Pflanzenschutz und zur Düngung sowie zur Vermeidung der Einschleppung fremder Pflanzenarten. Im Kontext der Gesamtentwicklung der indischen Volkswirtschaft wird als wichtiges Nachhaltigkeitsziel die Verminderung der Landflucht genannt.

Im Jahr 1999 wurde eine nationale Strategie zur nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume entwickelt. Hierbei geht es um die Ernährungssicherung und die Bekämpfung des Hungers sowie die Steigerung von Wirtschaftswachstum und Beschäftigung. Basierend auf der Einteilung des Landes in Agrarumweltzonen wurden die Land-, Wasser- und Vegetationsressourcen sowie die sich daraus ergebenden Produktionspotenziale analysiert und in konkrete Produktionsempfehlungen umgesetzt. In dem „Atlas of the Sustainability of Food Security in India“ wird die Fähigkeit der einzelnen Bundesstaaten untersucht, die Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln sicherzustellen (MSSRF 2004). Dass in Indien neben der Nahrungsversorgung auch Umweltaspekte eine wichtige Rolle spielen, verdeutlichen die Ausführungen zur Versalzung und zur Erosion, wobei insbesondere das Problem der Bodenverluste durch Erosion in Indien inzwischen ein bedrohliches Ausmaß von durchschnittlich fast 17 t/ha/Jahr erreicht hat. Daneben werden auch die zeit- und bedarfsgerechte Ausbringung der Betriebsmittel und die Entwicklung von integrierten Systemen beim Pflanzenschutz genannt.

Die Anwendungsmöglichkeiten von PA zur nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft sind in Indien aufgrund der Besitz- und Kapitalverhältnisse, der Betriebsgrößen (im Durchschnitt kleiner als 1 ha) und der Vielfalt der angebauten Kulturpflanzen begrenzt. Trotz dieser Schwierigkeiten sieht Indien PA als wichtige Technik zur nachhaltigen Entwicklung der pflanzenbaulichen Produktionssysteme (Anonym 2005c). Die nationalen und regionalen staatlichen Ebenen Indiens haben die Einführung von PA als innovative und wichtige Technik für die Pflanzenproduktion in ihren Zukunftskonzepten integriert und fördern diese durch finanzielle Unterstützung (Anonym 2003). In Indien – aber auch in anderen Entwicklungs- und Schwellenländern wie China und einigen Nationen in Südamerika (Anonym 2002) – wird darüber hinaus auch die Forschung und Entwicklung zu PA in den letzten Jahren zunehmend gefördert (Anonym 2005d u. 2005e). Die größte Herausforderung für die Wissenschaft stellt dabei die Anpassung von PA an die indischen Verhältnisse (d. h. große Unterschiede in den Standortverhältnissen und kleine Betriebsgrößen) dar (Shanwad 2005).

Europäische Nachhaltigkeitsansätze

Auf der europäischen Ebene wurden in der Folge von Rio verstärkt Aktivitäten zur Integration von Nachhaltigkeitsstrategien in die Landwirtschaft entfaltet. Initiiert durch die Verträge von Maastricht (1992) und Amsterdam wurde insbesondere durch die Tagung des Europäischen Rates in Cardiff (1998) ein Prozess (so genannter Cardiff-Prozess) angestoßen, der eine verbesserte Berücksichtigung von Umweltbelangen in allen Politikbereichen der EU fordert.

In der so genannten Lissabon-Strategie (EU 2002) zur wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Erneuerung, der EU definierte der Europäische Rat das Ziel, die EU bis 2010 „zum wettbewerbsfähigsten und dynamischsten wissensbasierten Wirtschaftsraum in der Welt“ zu machen, weil eine stärkere Wirtschaft nicht nur der Schaffung von Arbeitsplätzen förderlich ist, sondern auch einer Sozialpolitik und einer Umweltpolitik, die eine nachhaltige Entwicklung und soziale Integration gewährleisten. Bislang konnten bei der Umsetzung der Lissaboner-Strategie, die aus 28 Hauptzielen und weiteren 120 untergeordneten Zielen sowie insgesamt 117 Indikatoren besteht, nur mäßige Erfolge verzeichnet werden (EU 2005).

Der starke Fokus auf ökonomische Nachhaltigkeit wurde auf der Tagung des Europäischen Rates in Göteborg (2001) durch die Erweiterung um eine ökologische Dimension relativiert. Als grundlegend für eine insgesamt nachhaltige Entwicklung wurde nun definiert, dass das Wirtschaftswachstum, die Umweltqualität und die soziale Integration gleichrangige Nachhaltigkeitsziele sind. Mit Blick auf die Erreichung dieses Ziels wird der Schwerpunkt auf eine kohärente Politikgestaltung und den Ausgleich zwischen widersprüchlichen Zielen und Interessen nachhaltiger Entwicklung gelegt. Um dies zu realisieren, hat die EU-Kommission 2002 ein Folgenabschätzungsverfahren eingeführt, mit dem bei größeren politischen Vorhaben die zu erwartenden wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Auswirkungen identifiziert und bewertet werden sollen.

Auf ihrer Tagung in Göteborg wurde von den Staats- und Regierungschefs der EU-Länder außerdem beschlossen, die Vision einer nachhaltigen Entwicklung in eine operationelle Strategie umzusetzen. Diese von der EU-Kommission (EU 2001) entwickelte EU-Nachhaltigkeitsstrategie beinhaltet ein Nachhaltigkeitskonzept, dessen langfristiges Ziel die integrative Betrachtung der wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Dimension ist. Es wurden sechs wichtige Handlungsbereiche identifiziert, darunter auch das Management natürlicher Ressourcen. Zu jedem dieser Bereiche wurden Hauptziele definiert und politische Maßnahmen festgelegt, die als geeignet angesehen werden, zur Erreichung dieser Ziele beizutragen. Die Ausgestaltung der Gemeinsamen Agrarpolitik stellt einen Schwerpunkt der EU-Strategie für eine nachhaltige Entwicklung des Ressourcenmanagements dar. Zur Erfüllung der Lissaboner Strategieziele wurde in Göteborg für die Landwirtschaft als Leitprinzip „eine gute wirtschaftliche Leistung in Verbindung mit einer nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen“ festgelegt und in Thessaloniki (2003) bestätigt. Das Ziel soll u. a. durch umweltfreundliche Produktionsmethoden (z. B. Ökolandbau, PA) und der Nutzung nachwachsender Rohstoffe erreicht werden.

Die Situation in Deutschland

In Deutschland haben verschiedene Institutionen Zielvorstellungen bzw. Konzepte zur Konkretisierung und Umsetzung des Leitbildes nachhaltiger Entwicklung in der Landwirtschaft ausgearbeitet. Hierzu gehören beispielsweise die Bundesregierung (2002), das Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL 2000), das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU 1997), die Enquete-Kommission (1998), der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU 1996), das Umweltbundesamt (UBA 1997), das Wuppertal Institut (Wuppertal Institut 1996), die Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg (Linkh et al. 1997), die Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (Coenen/Grunwald 2003), der Deutsche Bauernverband (DBV 2000) und der Naturschutzbund (NABU 2002). Einige dieser Arbeiten sollen hier kurz vorgestellt werden.

2002 hat die damalige Bundesregierung eine nationale Nachhaltigkeitsstrategie mit 21 Zielen und 25 Indikatoren für eine nachhaltige Entwicklung beschlossen (Bundesregierung 2002). Diese Strategie enthält auch für den Bereich Landwirtschaft direkte und indirekte Zielsetzungen. Als Kern eines neuen Leitbildes der Landwirtschaft wird eine qualitätsorientierte und umweltverträgliche Produktion entsprechend den Grundsätzen einer nachhaltigen Entwicklung genannt, wobei der vorsorgende gesundheitsbezogene Verbraucherschutz vorrangig ist. In der Nachhaltigkeitsstrategie wird davon ausgegangen, dass der Ökolandbau weitgehend den Kriterien einer nachhaltigen Landwirtschaft entspricht. Sein Anteil soll deshalb bis 2010 auf 20 Prozent der LF ausgedehnt werden. Dieser Indikator wurde allerdings von verschiedenen Seiten kritisiert. In den Ausführungen des „Country Profile“ (zur Vorbereitung des Gipfels von Johannesburg 2002) wird die Bedeutung der „guten fachlichen Praxis“ zur Förderung nachhaltiger Landwirtschaft unterstrichen. Außerdem wird auf die Beschlüsse des Bund/Länder-Planungsausschusses Agrarstruktur- und Küstenschutz (PLANAK) zur Förderung des Ökolandbaus in Produktion und Vermarktung, der Einführung des integrierten Pflanzenschutzes und auf Maßnahmen zum Schutz der genetischen Ressourcen und zur Förderung von nachwachsenden Rohstoffen verwiesen. Im Bereich Forschung werden neben den Aktivitäten im Bodenschutz v. a. Entwicklungen bei Entscheidungsmodellen im Bereich der Düngung und des Pflanzenschutzes[28] sowie Strategien zur Verminderung von Stickstoff- und Phosphorverlusten in der Tierhaltung hervorgehoben.

Der Deutsche Bauernverband (DBV 2000) hat zehn Orientierungspunkte zur Entwicklung einer nachhaltigen Land- und Forstwirtschaft erarbeitet. Neben der Erzeugung qualitativ hochwertiger, gesunder Nahrungsmittel werden hier zunächst wirtschaftliche Ziele (Sicherung und Modernisierung der Arbeitsplätze, Einkommensverbesserung, Förderung und Stabilisierung des ländlichen Raumes als Wirtschaftsstandort, Erhalt der Kultur- und Erholungslandschaft) aufgeführt. Zu den umweltbezogenen Zielen gehören der Schutz der Artenvielfalt, der Er-

[28] Durch die Einführung entsprechender Modellansätze soll der Verbrauch von Pflanzenschutzmitteln vermindert werden, ohne die Produktionsrisiken zu erhöhen.

halt der Bodenfruchtbarkeit, der sorgfältige Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln, die Bereitstellung und Reinhaltung des Grundwassers und die nachhaltige Nutzung von Wasser. Die Nachhaltigkeitsziele sollen auf der Basis des aktuellen Erkenntnis-, Forschungs- und Entwicklungsstands unter Partizipation der Beteiligten umgesetzt werden.

Auch die Wissenschaft hat sich mit der Entwicklung von Konzepten und Zielen für eine nachhaltige Entwicklung in der Landwirtschaft auseinandergesetzt. Aus einer Analyse von mehr als 50 Definitionen aus der agrarwissenschaftlichen Forschung lassen sich in Anlehnung an Werner/Christen (2004, S. 27) sechs grundlegende Teilaspekte der Nachhaltigkeit identifizieren:

- Sicherung der Nahrungsmittelversorgung und -qualität,
- Ressourcenschonung (Boden, Wasser, Luft),
- Erhalt der biologischen Vielfalt,
- Verbesserung der wirtschaftlichen Situation landwirtschaftlicher Betriebe,
- globale Perspektive (Ernährung der Weltbevölkerung, Klimaschutz),
- intra- und intergenerationelle Gerechtigkeit.

Weitere wichtige und in vielen politischen Dokumenten genannte Nachhaltigkeitsziele sind die Nutzung nachwachsender Rohstoffe, das Wohlbefinden der Tiere und der Erhalt der Kulturlandschaft sowie die Stärkung der Wirtschaftkraft und die Verbesserung der Beschäftigungssituation in ländlichen Räumen. Obwohl Umfang und Anspruch der hier vorgestellten Nachhaltigkeitsziele unterschiedlich sind, ist den Ansätzen gemeinsam, dass meist wenig konkrete Aussagen über die Operationalisierung einer nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft gemacht werden. Die Vielfalt der Anforderungen, die an eine nachhaltige Entwicklung der Landwirtschaft gestellt werden, zeigt aber die Bedeutung, die der Landwirtschaft innerhalb einer nachhaltigen Entwicklung zukommt. Lediglich die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung sowie die Veröffentlichungen des Bauernverbandes lassen einen Zusammenhang mit der Produktionstechnik erkennen, indem die Beziehung zu ökologischen bzw. integrierten Anbaumethoden hergestellt wird.

Vergleich nationaler Nachhaltigkeitsziele

Die nationalen Ziele einer nachhaltigen Landwirtschaft können unterschiedlich sein, da sie stark von naturräumlichen Voraussetzungen, nationalen Besonderheiten und politischen Prioritätensetzungen abhängen. In Indien und Japan beispielsweise stellt die Förderung der inländischen Erzeugung von Nahrungsmitteln ein Hauptziel nachhaltiger Entwicklung dar. In Deutschland ist weniger die Quantität als vielmehr die Qualität der erzeugten Nahrungsmittel wichtig, da der deutsche Selbstversorgungsgrad, der das Verhältnis inländischer Erzeugung zum inländischen Verbrauch darstellt, bei Getreide, Zucker und Rindfleisch deutlich über 100 Prozent liegt[29] (DBV 2005).

Unter nationalen Zielvorstellungen zur nachhaltigen Landbewirtschaftung gibt es einige Übereinstimmungen. Dies betrifft v. a. Nachhaltigkeitsziele, die nur durch Anstrengungen aller Staaten erreicht werden können, wie z. B. die ausreichende Versorgung einer weiter wachsenden Weltbevölkerung mit Nahrungsmitteln, und solche, die den Klima- und Naturschutz anbelangen. In Deutschland, Australien und in den USA ist neben der Arbeitsplatzsicherung und der Einkommensverbesserung v. a. für Familienbetriebe auch die weitere Verringerung der Umweltbelastungen durch landwirtschaftliche Aktivitäten ein wichtiges Nachhaltigkeitsziel. Während in Deutschland die umweltrelevanten Ziele ein relativ großes Gewicht haben, steht in den USA die Verbesserung der wirtschaftlichen Situation der landwirtschaftlichen Betriebe und der ländlichen Räume im Vordergrund. In den USA werden darüber hinaus eine Steigerung der Arbeitsmöglichkeiten in der Landwirtschaft sowie ein besserer Schutz der Gesundheit und Sicherheit der in der Landwirtschaft tätigen Personen als wichtige Nachhaltigkeitsziele genannt. Japan strebt dagegen eine Steigerung der betrieblichen Arbeitsproduktivität und für die Zukunft den Einsatz von Robotik in der Landwirtschaft an. In Australien werden ökonomische und umweltrelevante Aspekte nahezu gleichrangig behandelt, da diese auch auf der Betriebsebene miteinander verbunden sind.

Mit welchem konkreten Maßnahmenbündel die einzelnen Nachhaltigkeitsziele erreicht werden sollen, bleibt meist unklar. Eine Schwerpunktsetzung auf den ökologischen Landbau zur nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft findet sich insbesondere in Deutschland, Österreich und Schweden. In den USA, Japan und Australien nehmen dagegen andere Verfahren und Techniken zum Ressourcenschutz und zur verbesserten bzw. reduzierten Ausbringung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln (z. B. konservierende Bodenbearbeitung, integrierter Pflanzenschutz, verbessertes Nährstoffmanagement) einen großen Raum in der Nachhaltigkeitsdebatte ein.

Der Beitrag von PA zur nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft wird in den Ländern differenziert gesehen. Einerseits gibt es hohe Erwartungen an PA bezüglich der damit verbundenen Betriebsmitteleinsparungen und positiven Umwelteffekte. Andererseits sind die Anwendungsmöglichkeiten in Entwicklungs- aber auch in Industrieländern mit klein strukturierter Landwirtschaft (z. B. Japan) begrenzt. Zudem stellen die Anforderungen von PA an Betriebsgröße, Kapitalbedarf und technischen Sachverstand der Landwirte bedeutende Hemmnisse dar, die die Diffusion von PA begrenzen.

---

[29] Nahezu ausgeglichen ist die Versorgungsbilanz bei Milch und Kartoffeln. Bei Obst, Gemüse und Schaffleisch dagegen liegt der Selbstversorgungsgrad um 50 Prozent oder deutlich darunter. Zwischen gut 70 und 90 Prozent liegt der Selbstversorgungsgrad bei Eiern, Geflügel und Schweinefleisch.

2. Operationalisierung von Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft

Zur Umsetzung der Ziele nachhaltiger Landbewirtschaftung müssen diese konkretisiert und operationalisiert werden. Hierfür werden Nachhaltigkeitsindikatoren entwickelt, anhand derer ein Zustand analysiert, seine Veränderung beobachtet und der Effekt von Maßnahmen abgelesen werden kann. Aufgrund dieser vielfältigen Anforderungen kommt der Auswahl von Nachhaltigkeitsindikatoren eine große Bedeutung zu. Idealerweise sollten bei der Indikatorenauswahl wissenschaftliche (z. B. Repräsentativität und Adäquanz bezüglich der jeweiligen Nachhaltigkeitsprobleme), funktionale (z. B. Sensitivität gegenüber Änderungen im Zeitverlauf), praktische (z. B. Datenverfügbarkeit und Aufwand der Datenbeschaffung) Anforderungen sowie Anforderungen aus der Sicht der Nutzer (z. B. Zielfähigkeit, Richtungssicherheit, Verständlichkeit, Steuerbarkeit) berücksichtigt werden (Kopfmüller et al. 2001, S. 320). In der Praxis gelingt dies allerdings selten.

Aufgrund der zahlreichen Aktivitäten zur Indikatorenfindung existiert mittlerweile eine ganze Reihe an z. T. umfangreichen Indikatorsätzen, die zur Beschreibung von Entwicklungszuständen hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit geeignet sind (Kopfmüller et al. 2001, S. 322). In den nachfolgenden Abschnitten wird ein Überblick über die Indikatorfindung auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene gegeben und auf relevante Indikatoren für die Landwirtschaft eingegangen.

Internationale und europäische Indikatorensammlungen

Zu den wichtigsten internationalen Quellen für Nachhaltigkeitsindikatoren gehören die Arbeiten der Vereinten Nationen, der Weltbank (2000) und des World Resources Institute (2001). Die CSD der Vereinten Nationen hat 1995 mit der Entwicklung von Nachhaltigkeitsindikatoren begonnen. Orientiert an den 40 Kapiteln der Agenda 21 und strukturiert nach dem „Driving Force-State-Response“(DSR)-Schema hat die CSD einen Satz von 138 Indikatoren zur Erprobung in 20 ausgesuchten Ländern, darunter auch Deutschland, ausgewählt. Dabei wurden jeweils nur die vor dem Hintergrund nationaler Prioritäten, Probleme und Ziele relevanten Indikatoren zur Erprobung herangezogen. Die für den Bereich Landwirtschaft bedeutsamen Nachhaltigkeitsindikatoren sind nachfolgend (s. Kasten) dargestellt, decken aber im Wesentlichen nur den Umwelt- und Naturschutz ab.

Landwirtschaft und ländlicher Raum

- Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (PSM-Risiko-Indikator) (AI)
- Einsatz von Düngemitteln (AI)
- Nährstoffbilanzüberschüsse (AI)
- Energieeinsatz in der Landwirtschaft (AI)
- Landwirtschaftlich genutzte Fläche pro Kopf (ZI)
- Landwirtschaftliche Ausbildung (MI)
- Flächenanteil besonders extensiver Landbewirtschaftung an LF (MI)
- Flächenanteil des ökologischen Landbaus an LF (MI)
- Flächenanteil nachwachsender Rohstoffe an LF (MI)

Erhaltung der biologischen Vielfalt

- Veränderung der Landnutzung (AI)
- Anteil bedrohter u. ausgestorbener Tier- u. Pflanzenarten an einheimischer Artenzahl (ZI)
- Anteil gefährdeter Kulturpflanzensorten an der jeweiligen Gesamtzahl (ZI)
- Anteil gefährdeter u. ausgestorbener Biotope an Gesamtzahl der vorkommenden Biotoptypen (ZI)
- Index für Ökosystemveränderungen (z. B. Leitvogelarten) (ZI)
- Flächenanteil des integrierten Landbaus an LF
- Flächenanteil des ökologischen Landbaus an LF (MI)

Nachhaltige Bewirtschaftung empfindlicher Ökosysteme, hier: Berggebiete

- Nachhaltigkeitsindikatoren, z. B. für Alpenregionen, sind noch nicht entwickelt

Planung und Bewirtschaftung von Bodenressourcen
- Änderung des Landzustands (Bodenerosion) (ZI)
- Anteil der Böden mit hohen Stickstoffeinträgen (Stoffbilanzen) (ZI)

Schutz der Süßwasserressourcen
- Jährliche Entnahme von Grundwasser und Oberflächenwasser (AI)
- Einsatz von Pflanzenschutzmitteln/PSM-Risiko-Indikator (AI)
- Einsatz von Düngemitteln/Nährstoffbilanzüberschüsse (AI)
- Emissionsmengen Versauerung auslösender Luftschadstoffe (AI)
- Intensität der Nutzung der Wasserressourcen (Fördermenge zu Dargebot) (ZI)
- Belastung des Grundwassers mit Nitrat, PSM, versauerungsrelevanten Parametern (ZI)
- Belastung von Oberflächengewässern mit Gesamt-N, Gesamt-P, AOX, TOC (Güteklasse II) (ZI)
- Belastung von Oberflächengewässern mit PSM (ZI)
- Flächenanteil von extensiver Landbewirtschaftung u. ökologischem Landbau (MI)

Schutz der Ozeane, Meere und Küstengebiete
- Einleitung von Stickstoff und Phosphat in Küstengewässer (AI)

Schutz der Erdatmosphäre (Treibhauseffekt, Ozonabbau, Luftbelastung)
- Emission von Treibhausgasen als CO_2-Äquivalente (AI)
- Anteil erneuerbarer Energiequellen am Primärenergieverbrauch (AI)
- Fördermittel für erneuerbare Energien (MI)

Umgang mit gefährlichen Chemikalien
- Emissionen von Chemikalien aus der Landwirtschaft (z. B. Cadmium, Dioxine) (AI)

Veränderung der Konsummuster
- Marktanteil von Lebensmitteln aus ökologischem Anbau (AI)

Wissenschaft im Dienst einer nachhaltigen Entwicklung
- In FuE tätige Wissenschaftler und Ingenieure pro Mio. Einwohner (MI)

AI = Anforderungsindikator; ZI = Zustandsindikator; MI = Maßnahmenindikator
Quelle: nach Werner/Christen 2004, S. 32, geändert

Die gesamte Anzahl der CSD-Indikatoren wurde inzwischen auf einen Satz von 25 Indikatoren reduziert. Darin enthalten sind nur noch zwei für den Bereich Landwirtschaft relevante Indikatoren, der Umfang an Acker- und Dauerkulturflächen und der Verbrauch an Dünge- und Pflanzenschutzmitteln.

Zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit wurden 1993 von der OECD Umwelt-Schlüsselindikatorensets (auch für den Bereich Landwirtschaft) entwickelt und 1998 durch rund 50 sozioökonomische Indikatoren ergänzt (Kopfmüller et al. 2001, S. 323). Die langjährigen Aktivitäten bei der OECD im Bereich Landwirtschaft haben 2001 zu einem ersten Satz von Indikatoren für folgende Bereiche geführt (OECD 2001):

- soziokulturelle Aspekte (Landnutzung, Bevölkerung),
- Betriebsführung (Nährstoffe, Pestizide, Bewässerung, Zertifizierung),
- Nährstoffeinsatz (Stickstoffbilanzen),
- Pflanzenschutzmittelverbrauch (Wirkstoffmittelstatistik, Umweltrisiko)
- Wasserverbrauch (Landwirtschaft),

- Änderungen der Flächennutzung (Flächenstilllegung usw.),
- Bodenqualität (Bodenerosion durch Wasser und Wind),
- treibhauswirksame Gase (Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxide),
- biologische Vielfalt (innerartlich, zwischenartlich, auf Ökosystemebene),
- natürliche und naturnahe Flächen (Hecken u. Biotopverbund usw.),
- Landschaft (Typisierung, Bewertung, Strukturierung, Biotopkartierung).

Weitere auf EU-Ebene definierte Agrarumweltindikatoren finden sich in den Berichten der Europäischen Umweltagentur (EEA 2000, 2001, 2002, 2004) und beim Europäischen Statistischen Amt (EUROSTAT), das Zahlenreihen zur Landwirtschaft, Umwelt und ländlichen Entwicklung erfasst und veröffentlicht, welche meist die Basis für Agrarumweltindikatoren darstellen.

Auf EU-Ebene haben Agrarumweltindikatoren v. a. seit dem Europäischen Rat von Cardiff (1998) an Bedeutung gewonnen. Der Rat beauftragte die EU-Kommission, Indikatoren zu erarbeiten, um beurteilen zu können, inwieweit Umweltbelange in die Landwirtschaft integriert wurden. Im Jahr 2000 legte die EU-Kommission einen ersten Entwurf eines Sets an Indikatoren für die Integration von Umweltbelangen in die Gemeinsame Agrarpolitik vor. In der Folge wurden diese EU-Agrarumweltindikatoren „IRENA-Indikatoren" (Indicator Reporting on the Integration of Environmental Concerns into Agricultural Policy) genannt und in den Jahren 2003 bis 2005 weiterentwickelt. Basis der Arbeiten war das „Memorandum of Understanding" (MoU) zur Indikatorenentwicklung, das zwischen der Europäischen Kommission und der Europäischen Umweltagentur (EEA) abgeschlossen wurde. Seit Mai 2005 liegen als Ergebnisse vor, die federführend von der EEA erarbeitet wurden:

- Indikatorenbericht zu 35 IRENA-Indikatoren für die EU-15 („indicator report"),
- Indikatorenfaktenblätter zu 35 IRENA-Indikatoren,
- Bericht über die Integration von Landwirtschaft und Umwelt für die EU-15.

Zu den diskutierten 35 IRENA-Agrarumweltindikatoren der EU – tatsächlich sind es mehr, da diese z. T. in mehrere Einzelindikatoren zerfallen – gehören u. a. der Verbrauch an Mineraldünger und Pflanzenschutzmitteln und die ökologisch bewirtschafte Fläche (EEA 2005). Indikatoren zur Operationalisierung der ökonomischen und der sozialen Dimension nachhaltiger Entwicklung in der Landwirtschaft liegen nicht vor.

Nationale Nachhaltigkeitsindikatoren

Neben den zur Erprobung herangezogenen CSD-Indikatoren sind in Deutschland weitere Indikatorenlisten entwickelt worden. An erster Stelle zu nennen sind hier die 25 Indikatoren der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie, anhand derer die Verbesserung des Nachhaltigkeitszustands abgelesen werden soll. Unter diesen finden sich folgende Indikatoren mit Bezug zur Landwirtschaft:

- Anteil des ökologischen Landbaus,
- Stickstoffbilanzüberschuss auf Sektorebene,
- Artenvielfalt,
- Klimaschutz (Emissionen von Treibhausgasen),
- Erneuerbare Energien (energetische Nutzung von Biomasse),
- Flächeninanspruchnahme (Flächennutzungskonkurrenz),
- Luftqualität (Emission von NH_3 oder NO_x).

Die Beurteilung der nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft anhand des Indikators „Anteil des ökologischen Landbaus" wurde kritisiert, u. a. weil selbst bei optimistischer Einschätzung in absehbarer Zeit nur ein vergleichsweise geringer Teil der landwirtschaftlichen Nutzfläche nach den Vorgaben des ökologischen Landbaus bewirtschaftet werden wird. Der weitaus größte Teil der Landwirtschaft bleibt somit unberücksichtigt. Außerdem gibt es auch andere Wege zur Erreichung einer nachhaltigen Landwirtschaft, die mit diesem Indikator nicht erfasst werden.

Aufgrund internationaler Vereinbarungen gibt es eine Reihe umwelt- und naturschutzrelevanter Ziele und Indikatoren mit Relevanz für die Landwirtschaft, deren Nichteinhaltung zum Teil mit Sanktionen belegt ist (Tab. 14). Im Vergleich zum Umwelt- und Naturschutz ist der Prozess der Ziel- und Indikatorenfindung hinsichtlich einer ökonomisch nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft noch im Fluss. Welcher Indikator als geeignet erachtet wird, hängt sehr stark von der betrachteten räumlichen Ebene ab. Auf der Ebene des landwirtschaftlichen Betriebes wird der Gewinn als Indikator diskutiert, allerdings hängt die Gewinnentwicklung erheblich von den Erträgen und Kosten ab. Alternativ hierzu werden als mögliche Indikatoren die Existenzfähigkeit der landwirtschaftlichen Betriebe sowie die Sicherung von Arbeitsplätzen im ländlichen Raum genannt (Werner/Christen 2004, S. 63).

Auf der Ebene einzelner Produktionsverfahren könnte der Deckungsbeitrag (Leistungs- und Kostenrechnung) ein geeigneter Indikator zur Bewertung der ökonomischen Effizienz darstellen. Durch Einbeziehung weiterer Indikatoren könnten hier auch die ökologische Effizienz und „trade-offs" zwischen den Indikatoren ermittelt werden (Müller et al. 2000, nach Werner/Christen 2004, S. 63). Ein weiterer zur Diskussion gestellter Indikator aus dem ökonomischen Bereich ist die „optimale spezielle Intensität". Bei dieser Größe wird die Höhe des Faktoreinsatzes – meist Dünge- oder Pflanzenschutzmittel – der damit erzielten Ertragssteigerung gegenübergestellt. Entscheidend für die Höhe der optimalen speziellen Intensität sind wieder die Preise und Kosten eines spezifischen Produktionsverfahrens. Es lassen sich dabei allerdings wichtige

Tabelle 14

Umwelt- und naturschutzrelevante Ziele und Indikatoren mit Relevanz für die Landwirtschaft

Indikator	Ziel	Quelle
Anteil Ökolandbau an LF	Steigerung von 4,3 % (2004) auf 20 % bis 2010	Nachhaltigkeitsstrategie Bundesregierung 2002
Verringerung des Nähr- und Schadstoffeintrags in Ökosysteme	Reduzierung des N-Überschusses in der Sektorbilanz von 117 auf 80 kg bis 2010	Nachhaltigkeitsstrategie Bundesregierung 2002
	Reduktion der PSM-Aufwendungen um 30 %	SRU 2004
	Reduktion der PSM-Aufwendungen um 15 % in 10 Jahren	Agrarministerkonferenz 2005
Verbesserung der Trinkwasserqualität	Nitrat-Grenzwert: 50 mg/l Nitrat-Richtwert: 25 mg/l PSM-Einzelwert: 0,1 µg/l PSM-Summenwert: 0,5 µg/l	EG-Trinkwasser-Richtlinie 80/778/EWG, Trinkwasser-VO, EG-Wasserrahmen-Richtlinie, Grundwasser-Richtlinie
	flächendeckend 40 mg/l Nitrat im Grundwasser bis 2030	SRU 2002
Verbesserung der Qualität der Oberflächengewässer	Halbierung der P- und N-Einträge in die Nord- und Ostsee im Vergleich zu 1985	OSPAR- u. HELCOM-Konvention 1992, SRU 2004
	guter chemischer u. ökologischer Zustand aller Gewässer	Wasserrahmen-Richtlinie 2000/60/EG
	Grünlanderhaltung in Überschwemmungsgebieten	BNatSchG 2002
Bodenschutz	Schutz des Bodens vor Erosion, Gefügeschäden und Humusabbau	Bundes-Bodenschutzgesetz (1998), BNatSchG 2002; Direktzahlungen-Verpflichtungen-VO
	Grünlanderhaltung auf erosionsgefährdeten Hügeln	BNatSchG 2002
	Grenzwerte für Schadstoffbelastung beaufschlagter Böden mit sekundären Rohstoffen	Abfall-Klärschlamm-VO, Bodenabfall-VO
Klimaschutz	Reduzierung der Emissionen klimarelevanter Gase von 1990 bis 2010 um 21 %	Kyoto-Protokoll
Schutz vor Eutrophierung und Versauerung	Senkung der Ammoniakemissionen von 600 auf max. 550 kt bis 2010	NEC-Richtlinie 2001/81/EG
Schutz nicht erneuerbarer Ressourcen	Steigerung des Anteils Biomasseenergie am Primärenergieverbrauch	EEG
Erhalt von halbnatürlichen u. natürlichen Biotopen	7 bis 10 % der Gesamtfläche als extensiv genutzte halbnatürliche Biotope	SRU 2002
	3 bis 5 % der Gesamtfläche als natürliche und naturnahe Biotope	SRU 2002
	Erhaltung von Grünland auf Standorten mit hohem Grundwasserstand u. Moorstandorten	BNatSchG 2002
	Pufferzonen von bis zu 300 m Breite zw. empfindlichen Biotopen und intensiv genutzter LF	SRU 2002
Biotopverbund	nationaler Biotopverbund auf mind. 10 % der Gesamtfläche	BNatSchG 2002
	Erhalt und Vermehrung von Landschaftselementen, Festlegung regionaler Mindestdichten durch die Länder	BNatSchG 2002
	Umsetzung des Netzes NATURA 2000	FFH-Richtlinie 92/43/EWG
historisch und ästhetisch wertvolle Landschaften	Orientierung an konkreten Flächenanweisungen der Landschaftsplanung	Europäische Landschaftskonvention
	Entwicklung einer Liste der wertvollen Kulturlandschaftstypen	SRU 2002

Quelle: nach SRU 2004, S. 180, geändert

Informationen zum rentablen Einsatzniveau von Betriebsmitteln auf der Ebene einzelner Produktionsverfahren gewinnen.

Die Entwicklung von Indikatoren für die Förderung der sozialen Komponente einer nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft steht noch am Anfang. Folgende soziale Indikatoren stehen zur Diskussion: der Wohlfahrtsindex, die Einkommensverteilung, der Anteil der in der Landwirtschaft Beschäftigten, Möglichkeiten für Weiterbildung, regionale Wohlstandsparameter, die Ausgestaltung von partizipatorischen Entscheidungsprozessen auf regionaler Ebene und die Freizeitgestaltung der Landwirte aber auch das Ansehen der Landwirtschaft in der Gesellschaft bzw. bei den Verbrauchern sowie die Attraktivität des landwirtschaftlichen Berufsbildes (Werner/Christen 2004, S. 65). Diese Vielzahl sehr heterogener Indikatoren ist für die derzeitige wissenschaftliche Diskussion symptomatisch und unterstreicht die erheblichen Schwierigkeiten, die mit der Messung von sozialen Gesichtspunkten im Rahmen der Nachhaltigkeit verbunden sind (Mansvelt 1997 u. Hurni 2000, nach Werner/Christen 2004, S. 66).

3. Einfluss von Precision Agriculture auf wesentliche Nachhaltigkeitsdefizite

In diesem Kapitel wird der Versuch unternommen, den Einsatz von PA in den oben ausgeführten Kontext einer nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft einzuordnen. Dies ist ein problematisches Unterfangen, da zum einen der unzureichende Wissensstand über PA die Ableitung verallgemeinerbarer Aussagen erschwert. Zum anderen ist nicht geklärt, welches Nachhaltigkeitskonzept zur Einordnung von PA herangezogen werden kann und wie eine ökonomisch und sozial nachhaltige Landwirtschaft aussehen soll. In der Literatur finden sich zwar einige Arbeiten mit Aussagen zur Bedeutung von PA im Kontext von Nachhaltigkeit (u. a. Ancev et al. 2004, Bongiovanni/Lowenberg-DeBoer 2004, Leiva et al. 1997, van Schilfgaarde 1999 nach Werner/Christen 2004). Diese Arbeiten haben aber einen unterschiedlichen und zudem oft eingeschränkten Blick auf die Gesamtwirkung von PA. Untersuchungen, die PA hinsichtlich ihrer Bedeutung für die nachhaltige Entwicklung der Landnutzung systematisch und integrativ bewerten, liegen nicht vor. Es ist daher nicht erstaunlich, dass die Diskussionen über den Beitrag von PA zur Erreichung einer nachhaltigen Landwirtschaft teilweise heterogen geführt werden.

Vor diesem Hintergrund beschränken sich die nachfolgenden Aussagen auf die Darstellung der Potenziale bestimmter PA-Anwendungen zur Verringerung wesentlicher Nachhaltigkeitsdefizite pflanzlicher Produktionsverfahren. Die ökologischen Nachhaltigkeitsdefizite nehmen dabei einen vergleichsweise großen Raum ein, da die pflanzliche Erzeugung zwangsläufig mit Eingriffen in die Umwelt einhergeht und hier mehr Klarheit über die relevanten Ziele und Indikatoren sowie die Entlastungspotenziale von PA besteht als bei den ökonomischen und sozialen Aspekten. Im Anschluss werden die Beiträge von PA-Anwendungen zur Verringerung folgender Nachhaltigkeitsdefizite analysiert:

- Stickstoffüberschüsse,
- Phosphatverbrauch und -eintrag in Oberflächengewässer,
- Anwendung von Pflanzenschutzmitteln,
- Verbrauch fossiler Energieträger,
- Beeinträchtigung der Bodenfunktionen,
- Verlust an Biodiversität,
- niedriges Einkommen und sinkende Beschäftigungsmöglichkeiten in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum.

Stickstoffüberschüsse

Stickstoff ist ein zentraler und preiswerter Pflanzennährstoff mit hoher Ertragswirksamkeit. Aus diesem Grund und weil die Produktionsfunktion vom Witterungsverlauf abhängig ist, wird in der landwirtschaftlichen Praxis eher etwas zu viel als zu wenig Stickstoff gedüngt. Dennoch ist es in Deutschland gelungen, den Verbrauch an mineralischem Stickstoffdünger in den letzten Jahren deutlich zu verringern: Er lag im Wirtschaftsjahr 2003/2004 mit rund 1,82 Mio. t um etwa 25 Prozent unter dem Stand von 1989/1990 (DBV 2004). Auch die auf Sektorebene bilanzierten Stickstoffüberschüsse[30] sind um ca. 8 Prozent auf 105 kg N/ha (verglichen mit dem Mittel der Jahre 1996 bis 2000) gesunken (Fortschrittsbericht der Bundesregierung 2004). Da gleichzeitig die Erträge gesteigert werden konnten, ist davon auszugehen, dass auch die Stickstoffeffizienz verbessert wurde.

Ziel der alten Bundesregierung war die Reduzierung des Stickstoffüberschusses in der Sektorbilanz auf 80 kg N/ha bis 2010. Die Differenz zwischen dem Istzustand und dem Zielwert zeigt, dass es weiterer Maßnahmen bedarf, um die Stickstoffüberschüsse landwirtschaftlich genutzter Flächen zu verringern. Handlungsbedarf besteht weiter, weil Deutschland sich in verschiedenen Abkommen und Richtlinien verpflichtet hat, die diffuse Gewässerbelastung mit Stickstoffverbindungen zu reduzieren (Halbierung der N-Einträge in die Nord- und Ostsee im Vergleich zu 1985 gemäß OSPAR- u. HELCOM-Konvention von 1992, und weil dieses Ziel noch nicht erreicht wurde. Weitere Nachhaltigkeitsziele, die in direktem Zusammenhang mit den Stickstoffüberschüssen der Landwirtschaft stehen, sind die weitere Verringerung der Nitratbelastung des Grundwassers auf unter 50 mg/l (Richtwert: 25 mg/l) (EU-Grundwasser-Richtlinie 80/68/EWG) und die Herbeiführung eines flächendeckend guten Zustands aller Gewässer bis 2015 (EG-Wasserrahmen-Richtlinie 2000/60/EG).

Zu den Maßnahmen, die zu einer Verringerung der Stickstoffüberschüsse und zu einer Verbesserung der Stickstoff-

[30] Die Eignung von einfachen Stickstoffbilanzen als Maßstab für das Auswaschungspotenzial und die tatsächliche Belastung wird von verschiedenen Arbeitsgruppen differenziert beurteilt. Große methodische Schwierigkeiten bestehen weiterhin in der korrekten Quantifizierung der Wirkung von Wirtschaftsdüngern und gasförmigen Verlusten in Form von N_2O und N_2.

effizienz führen können, gehören u. a.: Verringerung des Düngemitteleinsatzes, Verbesserung des Stickstoffmanagements, Verfahren zur standort- und bedarfsgerechten Ausbringung von Stickstoffdünger und emissionsarme Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdünger. Eine Reduzierung der Stickstoffüberschüsse wird darüber hinaus von einer Ausdehnung des Ökolandbaus erwartet, da hier aufgrund der Beschränkung auf Wirtschaftsdünger die flächenbezogenen Stickstoffüberschüsse mit 60 kg/ha (Haas 1995) deutlich niedriger ausfallen als im konventionellen Landbau. Außerdem konnte gezeigt werden, dass auch die Nitratausträge bei ökologischer Bewirtschaftung geringer ausfallen als bei konventioneller (Haas 2001; Haas et al. 2001). Da der Ökolandbau aber bislang nur wenige Prozent der landwirtschaftlich genutzten Fläche abdeckt, würde dieser auch bei einer weiteren Ausdehnung nicht ausreichen, um die zur Zielerreichung erforderliche substanzielle Verringerung der Stickstoffüberschüsse zu bewerkstelligen. Gleichwohl kann sie hierzu einen Beitrag leisten.

Überhöhte Nährstoffsalden bei einer rein mineralischen Stickstoffversorgung sind eher ein Managementproblem, das in feldinternen Standortheterogenitäten, Risikozuschlägen für (witterungsbedingte) Produktionsunsicherheiten und Qualitätsansprüchen seitens der Verarbeitung (z. B. Qualitätsweizen) begründet ist. Insbesondere in diesem Problembereich könnte PA einen Beitrag zur Verbesserung der N-Effizienz leisten. Beim gegenwärtigen Stand von Forschung und Entwicklung lässt sich durch teilflächenspezifische Düngung die Menge an mineralischem Stickstoffdünger im Durchschnitt um 14 kg N/ha verringern, bei konstanten oder um bis zu 6 Prozent erhöhten Erträgen. Dies entspricht einer Verbesserung der N-Effizienz um 10 bis 15 Prozent. Würde PA flächendeckend zur Ausbringung von mineralischen N-Düngern eingesetzt, so könnte hierdurch zwar das Nachhaltigkeitsziels der alten Bundesregierung (80 kg N/ha) nicht erreicht werden, aber immerhin könnten die nationalen Stickstoffüberschüsse um ca. 13 kg N/ha verringert werden. In wieweit dieses Betriebsmitteleinsparpotenzial von PA und die damit verbundene Verbesserung der N-Effizienz tatsächlich realisiert werden können, hängt u. a. davon ab, ob es gelingt, praxistaugliche N-Düngungs-Entscheidungssysteme zu entwickeln, die die Besonderheiten von Standort, Witterung, Kulturart, Ertragsniveau und Nutzungsrichtung hinreichend genau quantifizieren können.

Die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung kann zu einer besser an die Standortverhältnisse und den Bedarf des Pflanzenbestands angepassten Mineraldüngerausbringung und zu einer Verringerung der damit verknüpften ökologischen Nachhaltigkeitsdefizite führen. Die wesentlichen Gründe für die immer noch erheblichen Stickstoffüberschüsse in der nationalen Gesamtbilanz liegen allerdings weniger in der meist bedarfsgerechten Ausbringung mineralischer N-Dünger, sondern vielmehr in der regional ungleichmäßigen Verteilung der Tierhaltung und im lokal konzentrierten Anfall von Wirtschaftsdünger sowie einer schlechten N-Nutzungseffizienz bei den Wirtschaftsdüngern. Dieses Problem kann jedoch auch durch die Entwicklung von Verfahren zur teilflächenspezifischen Ausbringung von Wirtschaftsdüngern nur bedingt gelöst werden.

Verbrauch und Eintrag von Phosphat in Oberflächengewässer

Die Ausbringung phosphathaltiger Düngemittel hat im Wesentlichen zwei Implikationen, die hinsichtlich einer nachhaltigen Entwicklung als negativ angesehen werden: Zum einen betrifft dies den Phosphateintrag in Oberflächengewässer durch eine nicht angemessene Phosphatdüngung und Bodenerosion. Die bislang noch nicht erreichte Halbierung der Phosphateinträge in die Nord- und Ostsee (im Vergleich zu 1985, s. Tab. 14) zeigt, dass die Eutrophierung aquatischer Ökosysteme durch Phosphor anhält und hier Handlungsbedarf besteht. Die vorwiegend durch die Landwirtschaft verursachten diffusen Phosphateinträge in Fließgewässer (v. a. über die Bodenerosion durch Wasser) waren zwischen 1993 und 1997 für zwei Drittel (ca. 66 Prozent) der gesamten Phosphateinträge verantwortlich (Behrendt et al. 1999).

Zum anderen trägt die mineralische Phosphatdüngung maßgeblich zur Verringerung der endlichen Phosphatvorräte bei. Der Abbau der Phosphatlagerstätten ist zu 90 Prozent eine Folge des Phosphatbedarfs für die Produktion von Düngemitteln (Mengel 1997, nach Lindenthal 2000). Die Reichweite des weltweiten Phosphatvorkommens wird zwischen 88 (Anonym 1976) und bis zu 500 Jahren (Finck 1992) eingeschätzt, je nachdem welche Verbrauchszuwachsraten unterstellt und ob Phosphatlagerstätten[31], deren Erschließung zum heutigen Zeitpunkt noch unwirtschaftlich ist, einberechnet werden. Es wird vermutet, dass die weltweiten Phosphatvorräte nicht einmal mehr 100 Jahre reichen werden, wenn der Phosphatverbrauch der Entwicklungsländer ansteigt.

Ein weiteres Nachhaltigkeitsdefizit der Phosphatdüngung stellt die damit einhergehende diffuse Schwermetallbelastung landwirtschaftlich genutzter Flächen dar. Die als Ausgangsstoffe mineralischer Phosphatdünger verwendeten Rohphosphate[32] und die daraus hergestellten Düngemittel enthalten je nach Herkunft z. B. hohe Gehalte der toxischen Elemente Cadmium und Uran. Vor allem Sedimentsgesteine, die ungefähr 87 Prozent der Phosphat-Weltvorräte ausmachen, weisen erhöhte Cadmiumgehalte auf (Dachler 2002). Mit zunehmendem Verbrauch an Phosphat ist mit einer steigenden Cadmiumbelastung der Phosphatdüngemittel zu rechnen. Deshalb und wegen der Bedeutung landwirtschaftlicher Böden für die Nahrungsproduktion – der Mensch nimmt Schwermetalle zu über 75 Prozent mit der pflanzlichen Nahrung zu sich – haben die deutschen Agrar- und Umweltminister 2001 in

[31] Infolge der langjährigen hohen Phosphatdüngung werden die weltweiten Phosphatvorräte in landwirtschaftlich genutzten Böden (0 bis 50 cm) um das 17- bis 50fache höher eingeschätzt als alle Phosphatlagerstättenvorräte der Welt zusammen (Pagel 1987; Scheller 1993).

[32] Insbesondere der ökologische Landbau setzt derartige Rohphosphate ein, der integrierte Landbau nutzt u. a. Phosphatdünger aus aufbereiteten Phosphorquellen.

Potsdam beschlossen, dass es durch Bewirtschaftungsmaßnahmen zu keiner weiteren Anreicherung von Schadstoffen im Boden kommen darf. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden die zulässigen Cadmiumgehalte in phosphathaltigen Mineraldüngemitteln durch eine Änderungsverordnung begrenzt.

Überhöhte Düngungsempfehlungen und die unzureichende Berücksichtigung des Phosphats aus Wirtschaftsdünger haben in der Vergangenheit dazu geführt, dass es in Deutschland zu Phosphatüberdüngungen von im Durchschnitt 13 bis 25 kg P/ha/Jahr und Jahr kam (Harenz et al. 1992). Die Folge davon ist, dass 36 Prozent der landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Phosphat überversorgt sind (LUFA Rostock 2005). Weitere 26 Prozent der Flächen (meist extensiv genutzte Grünlandflächen) sind mit Phosphat unterversorgt und nur 38 Prozent sind optimal versorgt. Die Versorgung landwirtschaftlich genutzter Böden mit Phosphat bedarf also einer weiteren Optimierung. Darüber hinaus gilt es den Wirkungsgrad des Phosphateinsatzes, der heute bei weniger als 32 Prozent liegt (Agroscope 2004), zu steigern.

Veränderte agrar- und umweltpolitische Rahmenbedingungen (z. B. Flächenstilllegung), und eine andere Düngungsberatung und Düngungspraxis haben zu einem Rückgang des Absatzes von Phosphatdüngern in Deutschland – von rund 670 000 t im Jahr 1990 auf rund 350 000 t im Jahr 2000 – geführt (UBA 2002). Auch die Ausdehnung des ökologischen Landbaus hat zu einer Verringerung des Phosphatverbrauchs geführt, da er eine nahezu ausgeglichene Phosphatbilanz hat und bei deutlich geringerem Einsatz von Rohphosphaten weniger Phosphat im Boden akkumuliert.

Auf europäischer Ebene wird Phosphat aus landwirtschaftlichen Quellen in den rechtlichen Regelungsansätzen nicht berücksichtigt (SRU 2004, S. 216). Auch auf nationaler Ebene gibt es kaum Regelungsansätze für die Landwirtschaft. So sieht die bestehende Düngeverordnung für die Ausbringung von Wirtschaftsdünger auf mit Phosphat hoch versorgten Böden lediglich eine nicht sehr weitgehende Begrenzung der Phosphatdüngung vor. Zudem entstehen Gewässerbelastungen mit Phosphat bei der landwirtschaftlichen Nutzung v. a. durch Erosion, weshalb eine allgemeine Begrenzung der Phosphatdüngung allein nicht zielführend ist. Dennoch werden flächenbezogene Obergrenzen für Phosphat (SRU 1996) und ein nachhaltiger Umgang mit Phosphatdüngern gefordert.

Für einen nachhaltigen Einsatz von Phosphatdüngern, gibt es verschiedene Verfahren und Techniken: z. B. Züchtung von Pflanzensorten, die besonders effizient bei der Mobilisierung und Aufnahme von Phosphat aus dem Boden sind, Steigerung der Phosphateffizienz der Tierproduktion und neue Verfahren zum Recycling von Phosphat (z. B. aus Klärschlämm) (BMBF 2005b). Bei der Ausbringung phosphathaltiger Düngemittel sollte die Düngung nach Entzug erfolgen und nur dann durchgeführt werden, wenn der pflanzenverfügbare Phosphatgehalt des Bodens unterhalb einer bestimmten Konzentration liegt. Bei der Ermittlung des Versorgungszustands soll die räumliche Variabilität der Phosphatgehalte zukünftig stärker berücksichtigt werden.

Der Einsatz von PA zur teilflächenspezifischen Ausbringung von Phosphat kann dies leisten und so zum Abbau lokaler Phosphatüberschüsse beitragen. Allerdings ist dabei zu bedenken, dass zum einen der Absatz an Phosphatdüngern in Deutschland in den vergangenen Jahren bereits deutlich zurückgegangen ist und nur noch ein Drittel der landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Phosphat überversorgt ist. Zum anderen sind die flächenspezifischen Phosphatbilanzen reiner Ackerbaubetriebe überwiegend ausgeglichen. Die Nachhaltigkeitsprobleme beim Umgang mit Phosphat treten – analog zu Stickstoff – insbesondere in Gebieten mit hohen Viehbesatzdichten und konzentriertem Aufkommen an Wirtschaftsdünger auf. Verfahren zur teilflächenspezifischen, standort- und bedarfsgerechten Ausbringung von Wirtschaftsdünger könnten hier helfen, stecken aber noch in einer frühen Phase der Entwicklung.

Anwendung von Pflanzenschutzmitteln

Die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (PSM) ist eine wichtige Maßnahme zur Sicherung der Erträge und der Nahrungsmittelqualität. Andererseits sind einige PSM humantoxisch, andere stehen im Verdacht, krebserzeugend oder hormonell wirksam zu sein, und manche (meist ältere Substanzen) bauen sich in der Umwelt nur langsam ab und stellen als „gebundene Rückstände“ eine Langzeithypothek im Boden dar bzw. können sich in der Nahrungskette anreichern (SRU 2004, S. 227). Darüber hinaus kann die Ausbringung von PSM zu Umweltbelastungen führen, da PSM durch Verwehungen, Verdunstung mit nachfolgendem Niederschlag oder Abdrift in benachbarte Biotope bzw. in Oberflächengewässer[33] und durch Versickerung ins Grundwasser gelangen können.

Von Mitte der 1980er Jahre bis zu Beginn der 1990er Jahre gab es einen signifikanten Rückgang des PSM-Einsatzes bedingt durch einen verstärkten Einsatz von Mitteln mit geringen Wirkstoffkonzentrationen und eine Verbesserung der Sprühtechnik (Meyer 2002, S. 9). Seitdem verharrt der Absatz von PSM in Deutschland bei rund 34 000 t vermarktetem Wirkstoff im Jahr 2001 (BMVEL 2002, S. 81).[34] Dies entspricht einem Verbrauch von ca. 2 kg Wirkstoff/ha/Jahr landwirtschaftlicher Nutzfläche (UBA 2003b). Über den Inlandsabsatz von PSM-Wirkstoffmengen kann allerdings nicht unmittelbar auf den flächenspezifischen Verbrauch geschlossen werden, da die Mengen je nach Standort, Kulturpflanze, Anbauart, Fruchtfolge und Witterung z. T. erheblich variieren können und die PSM häufig über mehrere Jahre hinweg bei

[33] Zwischen 1996 und 2000 wurde in deutschen Flüssen bei über einem Viertel der Messstellen der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser PSM-Wirkstoffe oder ihre Metabolite nachgewiesen (SRU 2004, S. 228). Bei den PSM-Funden zeigt sich in den letzten Jahren eine Stagnation der Fundhäufigkeit; im Grundwasser sind die Funde sogar von 5 auf 0,1 Prozent zurückgegangen (UBA 2004).

[34] Seit kurzem deutet sich ein weiterer Rückgang in der abgesetzten Wirkstoffmenge an (UBA 2005).

den Landwirten gelagert werden. Um die Informationsbasis zur PSM-Anwendung zu verbessern, fordert das novellierte Bundesnaturschutz-Neuregelungsgesetz vom 25. März 2002 von der Landwirtschaft eine feldspezifische Dokumentation über den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (und auch Düngern) nach Maßgabe des landwirtschaftlichen Fachrechts („gute fachliche Praxis“) zu führen.

Angaben über die PSM-Ausbringungsmenge erlauben nur eine begrenzte Aussage über die damit verbundenen Umweltrisiken, da hierfür die Wirkungsintensität und Persistenz der Verbindungen maßgebend sind. Geringe Aufwandmengen und leichte Abbaubarkeit verringern das Risiko, dass PSM ins Grundwasser gelangen. Andererseits können moderne PSM aus ökotoxikologischer Sicht trotz geringerer Dosierung das gleiche Gefährdungspotenzial wie ältere PSM in hoher Dosierung aufweisen. Deshalb steht die Entwicklung und Anwendung geeigneter Pflanzenschutzrisikoindikatoren eine wichtige Forschungsaufgabe dar (BBA 2005a). Mit diesen Indikatoren und Modellen zur Errechnung des Umweltrisikopotenzials (wie z. B. „SYNOPS“ – Synoptische Bewertung des Risikopotenzials von PSM-Wirkstoffen –) können Fortschritte bei der Reduktion im Pflanzenschutz bewertet und sichtbar gemacht werden. Weitere in der Diskussion befindliche Indikatoren sind der „Behandlungsindex auf betrieblicher Ebene“ als Maß für die Intensität der PSM-Anwendung für einzelne Kulturen und Anbauregionen sowie der „Gehalt an PSM-Rückständen in Lebensmitteln“, gemessen durch die Anzahl der Überschreitungen von Rückstandshöchstmengen (BBA 2005b).

Angesichts der annähernd stagnierenden Absatzzahlen für PSM und der nach wie vor relevanten PSM-Belastungen in Grund- und Oberflächengewässern besteht dringender Handlungsbedarf zur Implementierung von Maßnahmen und Techniken zur weiteren Verringerung des Einsatzes von PSM. Da „das notwendige Maß der Anwendung an PSM zumindest teilweise überschritten wird“ (BMVEL 2004b, S. 6), wurde 2004 ein „Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz“ beschlossen, u. a. mit dem Ziel, die Anwendung chemischer PSM auf das notwendige Maß zu begrenzen. Auf der Agrarministerkonferenz vom März 2005 wurde beschlossen, den Einsatz chemischer PSM in Deutschland in den nächsten zehn Jahren um 15 Prozent zu reduzieren (Agrarministerkonferenz 2005).

Zur Verringerung der ausgebrachten PSM-Menge gibt es verschiedene Wege und Verfahren. Hierzu gehören u. a. die Förderung von Anbaumethoden mit geringem PSM-Bedarf (z. B. integrierter Pflanzenschutz, Ökolandbau), die mechanische Unkraut- und biologische Schädlingsbekämpfung, die weitere Verbesserung der Ausbringungstechnik (z. B. durch Veränderung von Düsenform und Wasserdruck), die regelmäßige Überprüfung der Spritzgeräte, die Intensivierung der Datenerfassung über Vertrieb, Ein- und Ausfuhr sowie der PSM-Anwendung sowie Verbesserungen der landwirtschaftlichen Beratung und der Kontrollen der PSM-Verwendung.[35]

Der situationsbedingt optimierte PSM-Einsatz im Rahmen des integrierten Pflanzenschutzes hat weltweit eine beträchtliche Bedeutung erlangt und wird häufig als wichtigste Maßnahme zur Erreichung einer nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft angesehen. Durch die konsequente Umsetzung der guten fachlichen Praxis – deren Bestandteil der integrierte Pflanzenschutz ist – könnte der PSM-Absatz um rund 30 Prozent verringert werden (SRU 2004). In der Praxis scheitert dieser Ansatz allerdings z. T. an unzureichend praktikablen Entscheidungsmodellen, bei denen es sich zudem häufig um Systeme für spezifische Schädlinge oder Krankheiten handelt. Seitens der Praxis wird darüber hinaus der hohe Kontrollaufwand für entsprechende Systeme beklagt. In diesem Zusammenhang wird deutlich, wie wichtig bei der Anwendung von PSM der Wissenstransfer in die Praxis und die Ausbildung der Anwender ist: Je größer die Fachkompetenz, desto geringer ist i. d. R. die Wahrscheinlichkeit von unsachgemäßer PSM-Anwendung.

Durch eine Ausdehnung des Ökolandbaus kann die Anwendung von PSM deutlich reduziert werden, da dieser ein integriertes Pflanzengesundheitsmanagement verfolgt, das vorrangig alle systeminternen Möglichkeiten zur Förderung der Pflanzengesundheit und des vorbeugenden Pflanzenschutzes sowie auf die Ausnutzung der Selbstregulationskräfte des Systems in Kombination mit zielkonformen Pflanzenbehandlungsmaßnahmen setzt. Durch das Verbot jeglicher Anwendung chemisch-synthetischer PSM im Ökolandbau ist eine Gefährdung durch Rückstände aus diesen Wirkstoffen in den Gewässern praktisch ausgeschlossen.[36] Dieses Potenzial des Ökolandbaus wird allerdings durch seine auf wenige Prozent der Anbaufläche beschränkte Anwendung kaum ausgeschöpft.

Der Einsatz von PA könnte nennenswerte – und im Vergleich zum Ökolandbau – großflächige Beiträge zum nachhaltigen Einsatz von PSM leisten. So kann die Herbizidaufwandmenge bei teilflächenspezifischer Applikation um bis zu 90 Prozent reduziert werden, wenn lediglich vereinzelte Unkrautnester auftreten. Allerdings ist zu bedenken, dass der Umfang der Herbizidanwendung in Deutschland v. a. durch den Getreideanbau (auf 59 Prozent der Ackerfläche) bestimmt wird. Für Getreide gibt es jedoch noch kein praxisreifes Verfahren zur teilflächenspezifischen Herbizidapplikation.

---

[35] Ein erheblicher Teil der PSM-Belastung resultiert aus so genannten „point pollutions“, die im Wesentlichen bei der Reinigung von Pflanzenschutzspritzen entstehen (Bach/Frede 2003). Hier kann mit vergleichsweise geringen Mitteln Abhilfe geschaffen werden, indem Restmengen auf den Flächen verteilt werden und auf dem Waschplatz entsprechende Filtersysteme installiert werden.

[36] Das spiegelt sich auch in der Besiedlung der Gewässer mit Tieren wider: In Oberflächengewässern, die von ökologisch bewirtschafteten Flächen umgeben sind, lassen sich wesentlich mehr naturraumtypische Arten nieder (UBA 2001).

Für eine wirtschaftliche Anwendung von PA im Pflanzenschutz ist die Weiterentwicklung von Methoden und Techniken zur raschen und kostengünstigen Erfassung und Kontrolle von Unkräutern, Krankheiten und Schaderregern im Bestand erforderlich. Darüber hinaus werden die Interaktionen zwischen Sortenwahl, Fruchtfolge, Düngung, Saatzeitpunkt usw. sowie standort- und witterungsspezifische Besonderheiten noch nicht ausreichend in den bisher verfügbaren Systemen zur Entscheidungsfindung berücksichtigt (Werner/Christen 2004, S. 99). Wenn entsprechende Entscheidungsunterstützungsmodelle verfügbar wären, könnte der Einsatz von PA zu einer besseren Umsetzung des Konzepts des integrierten Pflanzenschutzes führen, da hierdurch die Identifizierung von zeitlich und räumlich definierten Aktionsfeldern mit erhöhten Risiken („hot spots“) und die Realisierung von Hot-spot-Managementkonzepten (BBA 2005b) möglich ist. Ein weiterer Vorteil des PA-Einsatzes wäre die automatische feldbezogene Dokumentation der Anwendung von PSM.

Verbrauch fossiler Energieträger

Der Anteil der Landwirtschaft am Energieverbrauch der Gesamtwirtschaft ist gering und liegt bei etwa 1 Prozent (DBV 2004). Rund 40 Prozent davon stecken als „graue“ Energie in Maschinen und Gebäuden. Weitere 50 Prozent des Bedarfs gehen auf die Nutzung von Elektrizität und fossilbasierten Energieformen (Diesel, Benzin, Heizöl) zurück. Nur rund 6 Prozent des Energieverbrauchs werden für die Bereitstellung von landwirtschaftlichen Produktionsmitteln (Dünger, Pflanzenschutzmittel, Futtermittel, Saatgut) aufgewendet.

Zur Bewertung des Einflusses von PA auf die Energiebilanz pflanzlicher Produktionsverfahren werden i. d. R. die Indikatoren „Nettoenergiegewinn“ (in GJ/ha) und „Energieeffizienz“ (in GJ Input/GJ Output) verwendet (Fluck 1992; Geier/Köpke 2000; Küsters/Lammel 1999).

Der kulturartspezifische Nettoenergiegewinn pro Fläche zeigt einerseits eine deutliche Abhängigkeit von der mineralischen Stickstoffdüngung, die den Energiegewinn maßgeblich bestimmt. Andererseits stellt die Stickstoffdüngung einen wesentlichen energetischen Inputfaktor im Pflanzenbau dar und beeinflusst somit deutlich den bilanzierten Nettoenergiegewinn, dessen Optimum im unteren Bereich einer mineralischen Stickstoffdüngung liegt. Diese Gegenläufigkeit führt dazu, dass der energetisch optimale Faktoreinsatz i. d. R. aus einem reduzierten mineralischen N-Düngereinsatz in Kombination mit einem ertragssichernden Pflanzenschutzmitteleinsatz besteht. Zur Erreichung dieses Optimums kann PA einen Beitrag leisten. Darüber hinaus kann durch die teilflächenspezifische Bodenbearbeitung im Vergleich zur flächeneinheitlichen der Kraftstoffbedarf wesentlich eingeschränkt werden (Kap. IV.3).

Zur vergleichenden Bewertung von PA muss der Beitrag anderer Verfahren und Techniken zur Verringerung des Energiebedarfs in der Landwirtschaft betrachtet werden. Eine beträchtliche Verbesserung der Energiebilanz geht mit dem Pflugverzicht zugunsten von konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren einher, da die tief wendende Bodenbearbeitung eine besonders energieintensive Bewirtschaftungsmaßnahme ist (Chamen et al. 1996; Clements et al. 1995; Swanton et al. 1996). Nennenswerte Energieeinsparungen sind auch durch den ökologischen Landbau möglich, da dieser – bedingt durch den Verzicht auf Mineraldünger und chemisch-synthetische Pflanzenschutzmittel – einen deutlich geringen Energieverbrauch als die konventionelle Landwirtschaft hat.

Beeinträchtigungen von Bodenfunktionen

Zu den im Wesentlichen durch landwirtschaftliche Aktivitäten verursachten Beeinträchtigungen des Bodens und seiner Funktionen gehören u. a. die Bodenerosion und die Unterbodenverdichtung. Bei der Erosion kann es neben der Verminderung an Ertragspotenzial (durch Verlust der Wasserspeicherfähigkeit und Nährstoffnachlieferung) zu so genannten „Off-site-Schäden“ (durch Nährstoffverlagerung) kommen, die zur Eutrophierung von Ökosystemen führen können. Die Gefahr von – ebenfalls ertragsmindernden – Unterbodenverdichtungen kann durch die Nutzung immer leistungsfähiger und damit auch schwerer Traktoren und Arbeitsgeräte ansteigen, weil auch bei einer größeren Aufstandsfläche durch breite Reifen eine größere Tiefenwirkung eintritt. Andererseits können durch den Einsatz großer Maschinen auch Bodenverdichtungen vermieden werden, weil damit die Bewirtschaftungsmaßnahmen innerhalb der (oft kurzen) Zeitspanne, in der gute Arbeitsbedingungen herrschen, durchgeführt werden können.

Die konservierende Bodenbearbeitung stellt ein in der Praxis etabliertes, wirksames Verfahren zur Verringerung der Gefährdung von Böden durch Erosion und Bodenverdichtung sowie Verlust an organischer Bodensubstanz dar. In den letzten 10 bis 15 Jahren ist eine verstärkte Nutzung der konservierenden Bodenbearbeitung zu beobachten, die u. a. auch eine Folge der damit verbundenen arbeitswirtschaftlichen Vorteile (v. a. bei größeren Betrieben) und der Förderung durch Agrarumweltprogramme ist. Bei richtiger Anwendung der nicht wendenden Verfahren können damit gleiche, in einigen Fällen sogar höhere Erträge als bei einer konventionellen Bearbeitung erzielt werden. Allerdings ist die feld- und situationsspezifische Beurteilung der Eignung des Bodenzustands für konservierende Bearbeitungsverfahren noch nicht ausgereift und beruht derzeit fast ausschließlich auf Einschätzung der Landwirte (Werner/Christen 2004).

Der Einsatz der konservierenden Bodenbearbeitung stellt hohe Anforderungen an das Systemverständnis von Landwirten und Beratern und erfordert eine gute Einbindung in das Gesamtkonzept des Pflanzenbaus (einschließlich Fruchtfolge, Sortenwahl, Düngung und Pflanzenschutz). Es handelt sich nicht um den einfachen Ersatz einer tief wendenden Bearbeitung mit Pflug oder Grubber durch die konservierenden Systeme, sondern es bedarf deutlicher Umstellungen im Strohmanagement und in der Fruchtfolge, um zu verhindern, dass es zu einer vermehrten Verunkrautung und zu einem erhöhten Pilzbefall der Kulturpflanzen kommt. Bei einer sachgerechten Kombi-

nation von Sommerungen (Kulturpflanzen, die im Frühjahr ausgesät werden) und Körnerleguminosen in der Fruchtfolge können Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung auch ohne einen erhöhten Einsatz von Herbiziden und Fungiziden erfolgreich über viele Jahre durchgeführt werden. In der Praxis lässt sich dies jedoch aus verschiedensten Gründen (z. B. mangelnde Wirtschaftlichkeit von Leguminosen und Sommerungen) nicht in gleicher Weise erreichen, so dass es bei konservierender Bodenbearbeitung häufig zu einer stärkeren Verunkrautung kommt. Auch besteht die Gefahr, dass große Partien von Getreide aus konservierenden Anbausystemen aufgrund von Krankheitsbefall (z. B. Fusarien bei Getreide) und einer daraus hervorgehenden Mykotoxinbelastung der erzeugten Produkte nicht in den Handel gebracht oder verfüttert werden dürfen.

Grundsätzlich kann durch die Nutzung von PA durch teilflächenspezifische Bearbeitungstiefe und -intensität die Gefahr von Bodenerosion verringert werden. Hierzu liegen allerdings keine Untersuchungen vor. Die Vorteile teilflächenspezifischer Bodenbearbeitung sind v. a. in der damit verbundenen Reduktion des Treibstoffverbrauchs und der dadurch vermiedenen zusätzlichen Kohlendioxidemissionen zu sehen. Verglichen mit den konservierenden Verfahren sind die Effekte der Anwendung von PA zur teilflächenspezifischen Bodenbearbeitung als eher gering einzuschätzen. Inwieweit sich durch die Anwendung von PA-Techniken bei konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren deren Nachteile verringern lassen bzw. zusätzliche positive Effekte einstellen, ist nicht bekannt.

Verlust an Biodiversität

Die biologische Vielfalt (Biodiversität), zu der die genetische Vielfalt als auch die Artenvielfalt (wildlebende Fauna und Flora sowie Kulturpflanzenarten und -sorten) und die Vielfalt der Ökosysteme und Landschaftstypen gehören, ist eine der entscheidenden Grundlagen des menschlichen Lebens. Damit kommt dem Erhalt der biologischen Vielfalt eine wichtige Rolle für die nachhaltige Entwicklung zu.

Zur Erfassung der Gefährdungssituation der wildlebenden Fauna und Flora werden oft die „Roten Listen“ der Tiere und Pflanzen herangezogen. Von den für die „Rote Liste“ untersuchten und in Deutschland beheimateten Arten (knapp 50 Prozent bei den Pflanzen und 33 Prozent bei den Tieren) sind rund 50 Prozent der Pflanzen- und Tierarten gefährdet (BfN 2005a u. 2005b). Die für den Zeitraum von 1850 bis heute ermittelte Aussterberate bei Farn- und Blütenpflanzen liegt bei 32 Arten pro Dekade (BfN 2004). Zu den Verursachern des Artenrückgangs gehört nach der direkten Standortzerstörung durch Baumaßnahmen (betrifft 540 Arten) an zweiter Stelle die landwirtschaftliche Flächennutzung (betrifft 450 Arten). Sowohl die Unterlassung bestimmter Nutzungsarten (z. B. Handmahd) als auch die Intensivierung landwirtschaftlicher Flächennutzungen sind hier die Auslöser.

Auch die Vielfalt an landwirtschaftlich genutzten Kulturarten hat in Deutschland – ebenso wie in der EU und weltweit – in den letzten Jahrzehnten weiter abgenommen. Allgemein ist eine Konzentration auf sehr wenige Arten zu beobachten. Im globalen Maßstab ist diese Konzentration auf Mais, Weizen, Soja und Reis ausgerichtet. In Deutschland bilden heute nur noch zwölf Pflanzenarten die Grundlage unserer Ernährung. Der überwiegende Teil der Kulturpflanzen bleibt hingegen ungenutzt und ist sogar teilweise vom Aussterben bedroht (IÖW 2005). Die wichtigste Ursache für den Verlust von Agrobiodiversität ist die konventionelle Landbewirtschaftung, die aufgrund der agrarpolitischen und marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen v. a. auf den kurzfristigen Ertrag ausgerichtet ist.

Wenn bei einer Kulturart eine kritische Anbaufläche unterschritten wird – wie dies derzeit bei den Körnerleguminosen nicht unwahrscheinlich ist – sinkt die Bereitschaft der Zuchtunternehmen, entsprechende Züchtungen durchzuführen. Als Konsequenz stehen schon nach wenigen Jahren keine angepassten Sorten mehr zur Verfügung. Wird eine Kulturart nicht oder nur noch auf sehr geringer Anbaufläche genutzt (z. B. Buchweizen oder Faserlein) dann sind auch die Begleitflora und -fauna in ihrem Bestand gefährdet. Deshalb können die „Fruchtfolge auf Betriebsebene“ und die „Anbauhäufigkeit bestimmter Kulturpflanzen“ im regionalen Maßstab als indirekte Indikatoren zur Beurteilung der Agrobiodiversität verwendet werden.

Die EU hat sich verpflichtet, den Verlust von Biodiversität bis 2010 zu stoppen. In Deutschland gibt es verschiedene Programme und Konzepte zur Erhaltung von Biodiversität: So hat das BMU im September 2005 den Entwurf einer nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt vorgelegt. Biodiversität spielt in der Arbeit des Staatssekretärsausschusses für Nachhaltigkeit und im Rat für Nachhaltige Entwicklung eine zentrale Rolle.

Die Bewertung der nachhaltigen Entwicklung der Biodiversität ist schwierig. Dies ist zum einen in der Messung von „Biodiversität“ bedingt, bei der eher wissenschaftliche und weniger praktische Gesichtspunkte zum Ausdruck kommen. Zweitens ist die Zielwertdiskussion hier ungleich schwieriger als bei den abiotischen Indikatoren, da entweder mit hoch aggregierten Summenindikatoren, wie dem Diversitätsindex nach Shannon-Weaver[37], oder mit Einzelwerten argumentiert wird. Drittens gibt es bei der Quantifizierung der Biodiversität im weiteren Sinne noch beträchtliche methodische Unsicherheiten. So ist derzeit nicht geklärt, welche einzelnen Arten oder Artengruppen zur Messung der Biodiversität herangezogen werden sollten und wie dies mit vertretbaren personellen und finanziellen Mitteln umsetzbar ist.

Die Landwirtschaft, die über 50 Prozent der Gesamtfläche Deutschlands für ihre Produktionstätigkeit nutzt, spielt beim Erhalt der biologischen Vielfalt eine wichtige Rolle. Zu den diskutierten Möglichkeiten, die Biodiversität zu erhalten bzw. zu fördern, gehören u. a.: Erhalt

[37] Ein mathematisches Aggregationsverfahren, das sowohl die Anzahl unterschiedlicher Kulturarten als auch deren jeweiligen relativen Flächenumfang berücksichtigt.

regional angepasster Sortenvielfalt von Kulturpflanzen und vielfältiger Fruchtfolgen, Erhöhung des Flächenanteils des ökologischen Landbaus, Anwendung der „guten fachlichen Praxis“, Förderung freiwilliger Leistungen für die Biodiversität und Bewirtschaftungseinschränkungen auf schützenswerten Flächen.

Die Einordnung von PA als Instrument zur nachhaltigen Entwicklung der Biodiversität ist schwierig. Technisch ist es möglich, schützenswerte kleinräumige Bereiche in der Agrarlandschaft zu identifizieren und mit PA restriktiv zu bewirtschaften oder sie ganz aus der Nutzung zu nehmen. Bislang scheitert der Einsatz von PA zum Schutz von Biotopen jedoch daran, dass es methodisch schwierig ist, einzelnen Teilflächen landwirtschaftlich genutzter Flächen bestimmte Schutzziele zuzuordnen. Entsprechende einfache Einstufungssysteme werden zurzeit mit der landwirtschaftlichen Praxis prototyphaft eingeführt. Um zu nachvollziehbaren Arealabgrenzungen für Naturschutzziele innerhalb von Ackerflächen zu kommen, müsste ein erheblicher Aufwand betrieben werden, da für eine Vielzahl potenzieller Naturschutzqualitätsziele (NQZ) keine Modelle vorliegen, anhand derer solche räumlichen Entscheidungen getroffen werden können. Die Operationalisierung von NQZ ist eine komplexe Aufgabe, die nur unter Zuhilfenahme von Experten verschiedener Teilbereiche befriedigend bewältigt werden kann (Plachter/Janßen 2002). Eine Abschätzung, in welchem Umfang NQZ mittels PA umgesetzt werden können, ist schwierig. Wirkungskontrollen zeigen jedoch, dass in vielen Fällen wohl eine ganz erhebliche Modifizierung der Bewirtschaftungsmaßnahme erforderlich ist, um das NQZ mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erreichen. Ein Beispiel: Um günstige Entwicklungsbedingungen für die Begleitflora zu schaffen, müsste die Saatstärke auf 25 Prozent der normalen Menge reduziert werden (Kriegbaum 1997, nach Plachter/Janßen 2002).

Der Einsatz von PA könnte auch dazu beitragen, die positive Wirkung des Ökolandbaus auf die Artenvielfalt (Anonym 2004) zu fördern. Für den ökologisch oder konventionell wirtschaftenden Betrieb ist der Einsatz von PA zur Einhaltung von NQZ allerdings nur bei entsprechender Förderung interessant. Hier ist aber die Frage zu stellen, ob es nicht einfachere und kostengünstigere Wege gibt, um diese Ziele zu erreichen.

Zum Schutz von Biotopen sind bei der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln gesetzlich vorgeschriebene Mindestabstände zu sensiblen Nichtzielflächen, Gewässern und Saumstrukturen einzuhalten. Landwirte, die gegen diese Regelungen verstoßen, begehen eine Ordnungswidrigkeit und müssen mit empfindlichen Geldstrafen rechnen. Mit entsprechenden Computerprogrammen (z. B. „Abstandsmanager Pflanzenschutz“) können in Abhängigkeit wichtiger Parameter wie Relief, verwendete Düsen und eingesetzte Wirkstoffe für die wichtigsten Kulturen und Wirkstoffe die vorgeschriebenen Abstände zu Nichtzielflächen berechnet werden. Durch die Integration dieses oder eines ähnlichen Informationssystems könnte PA dazu beitragen, die Abstände nicht nur zu berechnen, sondern die Vorgaben gezielt umzusetzen und die errechneten Abstände auch automatisch einzuhalten sowie deren Einhaltung zu dokumentieren.

Niedrige Einkommen und sinkende Beschäftigungsmöglichkeiten in der Landwirtschaft

Einkommen

Ein selbständig tätiger Landwirt verdiente im Jahr 2003/2004 durchschnittlich 17 600 Euro brutto, was einem Monatseinkommen von 1 470 Euro entspricht. Der Einkommensabstand zur gewerblichen Wirtschaft liegt somit bei rund 34 Prozent (DBV 2005). Die Zahlen lassen vermuten, dass viele der kleinen landwirtschaftlichen Betriebe lediglich Einkommen im Bereich der Armutsgrenze erwirtschaften. Ein weiterer Hinweis darauf sind die anhaltenden Einkommensdisparitäten in der Landwirtschaft. Etwa 70 Prozent der landwirtschaftlichen Haupterwerbsbetriebe erreichen keinen Lohn entsprechend dem gewerblichen Vergleichslohn (BMVEL 2002).

Da sich eine Reduktion des Faktorinputs bzw. eine Ertragssteigerung bei Kulturarten mit einem relativ hohen Einsatz an ertragssteigernden bzw. -sichernden Betriebsmitteln – wie Kartoffeln oder Zuckerrüben – wesentlich stärker auf die Erhöhung des Deckungsbeitrages auswirkt als beim Anbau von Winterweizen, Körnermais oder Winterraps, wird ceteris paribus der Einsatz von PA am ehesten zur Einkommenssteigerung beitragen in Betrieben mit Fruchtfolgen, die einen hohen Anteil an intensiv angebauten Kulturpflanzen haben. So zeigen Modellrechnungen unter Annahme großer Einsatzflächen und einer 10 %igen Reduktion des Einsatzes an Saatgut, Stickstoff und Herbiziden bei Kartoffeln einen um ca. 67 Euro/ha und bei Zuckerrüben einen um 47 Euro/ha erhöhten Deckungsbeitrag, während bei eher extensiv angebauten Kulturen (z. B. Getreide) die Werte zwischen 18 und 28 Euro/ha liegen (Wagner 2005). Bei einer angenommenen zusätzlichen 10 %igen Ertragssteigerung wären die Unterschiede zwischen den intensiven Kulturen (plus 275 Euro/ha) und den extensiven (plus 100 Euro/ha) auf den Deckungsbeitrag noch deutlicher.

Auch die Modellrechnungen in diesem Bericht (Kap. IV.4) zeigen, dass bei deutlichen Betriebsmitteleinsparungen oder verringerten Investitionskosten für PA die Rentabilitätsschwelle je nach Annahmen und PA-Technologie meist erst ab mehreren hundert ha Fläche erreicht wird. Deshalb profitieren in erster Linie große Betriebe von möglichen höheren Einkommen durch den Einsatz von PA. Aber auch in Agrarstrukturen mit kleinen Betrieben und Feldgrößen kann PA eingesetzt werden, z. B. im Rahmen einer Gewannebewirtschaftung oder über Betriebsgemeinschaften oder Maschinenringe. Neben der Bewirtschaftung von Gewannen über die Grenzen der Teilfelder hinweg können teilflächenbezogene Auswertungen ohne hohen Zusatzaufwand durchgeführt werden. Es konnte gezeigt werden (z. B. im Forschungsprojekt Zeilitzheim und am Praxisbeispiel Riedhausen), dass eine Gewannebewirtschaftung mit Unterstützung durch PA-Technik zu Deckungsbeitragssteigerungen von bis zu 150 Euro/ha/Jahr führen kann (Rothmund et al. 2003). Gleichzeitig sinkt der Arbeitszeitbedarf um über

30 Prozent. Darüber hinaus ergeben sich Vorteile hinsichtlich der Qualitätssicherung durch überbetriebliche Planung und Erfassung. Die Gewannebewirtschaftung mit Unterstützung durch PA stellt damit eine Chance für Betriebe mit kleinräumigen Strukturen dar, ihre Wettbewerbsfähigkeit zu stärken und sich trotz des fortschreitenden Wandels in der landwirtschaftlichen Betriebsstruktur sowie abnehmender Gewinnspannen bei der landwirtschaftlichen Produktion ihre Existenzfähigkeit zu sichern. Trotz dieser Vorteile ist die Umsetzung des Konzepts der Gewannebewirtschaftung in der Praxis schwierig, da nicht alle Landwirte ausreichend kooperationswillig sind, weil gemeinsame Entscheidungen hinsichtlich Flächennutzung und -belegung, Bewirtschaftung, Bestandsführung und Maschineneinsatz getroffen werden müssen.

Eine abschließende Aussage über den potenziellen Beitrag von PA zur Verbesserung der Einkommen in der Landwirtschaft und zur Sicherung der Existenzfähigkeit von Betrieben kann auf Grundlage der vorliegenden Untersuchungen weder für Einzelbetriebe noch für eine Gewannebewirtschaftung getroffen werden. Tendenziell werden die ökonomischen Vorteile von PA umso deutlicher ausfallen, je heterogener das bewirtschaftete Feld und je höher die Produktionsintensität (bzw. der Anteil an intensiven Kulturpflanzen) sind. Weiter ist davon auszugehen, dass der Einkommenseffekt des gemeinsamen Einsatzes verschiedener PA-Anwendungen bedingt durch Synergieeffekte (z. B. durch Mehrfachnutzung von Daten und Geräten) wirtschaftlicher ist als die Summe der Einzelverfahren (Werner/Christen 2004, S. 139). Darüber hinaus ist zu vermuten, dass mit den gegenwärtig verfügbaren Methoden für PA-Anwendungen die ökonomischen Potenziale nicht sicher ausgeschöpft werden. Witterungseinflüsse beispielsweise scheinen den Erfolg von Düngemaßnahmen wesentlich stärker zu beeinflussen als die räumliche Heterogenität des Standorts. Es ist weiter davon auszugehen, dass mit fortschreitendem Stand der Technik die Präzision der Arbeitsschritte weiter optimiert werden kann und bei einer zunehmenden Anwendung in der Praxis die Anschaffungskosten sinken werden. Auch ein Preisanstieg bei den Betriebsmitteln und Forschritte bei der Technik- und Methodenentwicklung können zu einer Rentabilität der PA-Anwendung schon bei geringerer Flächenausstattung führen.

Beschäftigungseffekte

Im Allgemeinen sind bisher keine direkten Rationalisierungseffekte durch PA hinsichtlich des Arbeitskraftbedarfs erkennbar (Strecker et al. 2004a, S. 64). Es ist im Gegenteil möglich, dass durch den relativ hohen Bedarf an Wissenstransfer, Aus- und Weiterbildung und IT-Support für die Landwirte mit der Diffusion von PA-Anwendungen zusätzliche Arbeitsplätze im ländlichen Raum geschaffen werden. Vor allem kleinere Betriebseinheiten werden, falls sie sich für PA entscheiden, auf die fachliche Unterstützung seitens externer Berater zurückgreifen müssen. Dies werden zum einen fachlich kompetente Mitarbeiter bei überbetrieblichen Einrichtungen (u. a. Maschinenringe, Lohnunternehmer) sein, aber auch Berater zur Pflanzenproduktion, die sich die notwendigen Kompetenzen zu PA-Techniken gezielt aneignen. Hierdurch können zusätzliche, relativ (im Vergleich zu den Entlohnungen seitens der landwirtschaftlichen Betriebe) hoch bezahlte Tätigkeiten im ländlichen Raum entstehen (Lowenberg-DeBoer 2002). Andererseits könnte PA durch die fehlende Rentabilität eines Einsatzes in kleinen Betrieben langfristig möglicherweise auch zu einer Beschleunigung des Strukturwandels in der Landwirtschaft und somit zum Abbau von Arbeitsplätzen im ländlichen Raum führen.

Es liegen keine systematischen und vergleichenden Untersuchungen über den zusätzlichen Zeitbedarf der Landwirte für PA vor. Zumindest in der Anfangsphase ist jedoch mit einem deutlich höheren Arbeitsaufwand zu rechnen. Neben Inbetriebnahme und Einarbeitung entsteht ein erheblicher Zeitbedarf v. a. durch die Arbeit am Computer und ggf. durch zusätzliche Feldbegehungen. Der zusätzliche Betreuungsaufwand für die neue Technik wird häufig unterschätzt (Jürschik 1999). Andererseits können mit Hilfe von PA Arbeitsspitzen entzerrt werden, weil es hierdurch möglich ist, die grundsätzlichen theoretischen Überlegungen zum Anbau in arbeitsärmeren Perioden am Schreibtisch zu planen und teilweise schon im Voraus in Maschinenaufträgen niederzuschreiben. Das ermöglicht die optimale Berücksichtigung vorhandener Daten (Nährstoffe, Erträge, personelle und technische Ressourcen etc.) und spart Zeit während der Arbeitsspitzen. Zur Beurteilung der Maßnahmen ist und bleibt aber die aufmerksame Beobachtung der Betriebsflächen integraler Bestandteil der erfolgreichen Bewirtschaftung.

Durch den Einsatz von PA steigen auch die Anforderungen an die Fähigkeiten zum Umgang mit den neuen Technologien und zum Informations- und Arbeitsmanagement. Hierdurch wandelt sich das Berufsbild moderner Landwirte in Richtung Agrarmanager, der auf einem High-Tech-Bauernhof arbeitet. Die Attraktivität eines solchen „High-Tech-Berufes“ kann positive Effekte auf die Beschäftigungssituation im ländlichen Raum haben.

4. Fazit

In der internationalen Staatengemeinschaft besteht Konsens über die allgemeinen Grundsätze einer nachhaltigen Entwicklung. Wenn es allerdings darum geht, konkrete Ziele einer nachhaltigen Entwicklung zu benennen, dann gehen die Vorstellungen und Definitionen auch im Bereich der Landwirtschaft auf nationaler Ebene teilweise auseinander. Während beispielsweise auf globaler Ebene und für viele Entwicklungsländer (z. B. Indien) die Ernährungssicherung ein zentrales Ziel nachhaltiger Entwicklung darstellt, findet dieser Aspekt im Zielkatalog der Industrieländer meist wenig Beachtung (Ausnahme Japan), obwohl hierfür eine gemeinsame Verantwortung aller Länder (insbesondere derer mit guten ackerbaulichen Produktionsbedingungen) besteht, und diese im Millenniumsziel (Halbierung der Zahl der Hungernden weltweit von 1990 bis 2015) auch konkretisiert wurde. In Industrienationen wie Deutschland, USA oder auch Japan zählen zu den wichtigsten Nachhaltigkeitszielen die Verbesserung der wirtschaftlichen Situation und der Beschäf-

tigungsmöglichkeiten in der Landwirtschaft sowie die Verringerung von Umweltbelastungen durch landwirtschaftliche Aktivitäten.

Auf europäischer als auch nationaler Ebene ist der Stand der Operationalisierung der Ziele einer nachhaltigen Landwirtschaft durch konkrete Indikatoren und Zielgrößen für die verschiedenen Bereiche unterschiedlich. Während für die ökologische Dimension teilweise sehr detaillierte, durch politische Vorgaben verankerte Zielvorstellungen vorliegen und Indikatoren festgelegt wurden, steht die Diskussion über Ziele und Indikatoren einer ökonomisch und sozial nachhaltigen Entwicklung in der Landwirtschaft noch am Anfang.

Die systematische und integrative Bewertung und Einordnung von PA in den Kontext nachhaltiger Entwicklung ist nicht nur deshalb ein problematisches Unterfangen. Auch der gegenwärtig unzureichende Wissensstand in der PA-Forschung erschwert die Ableitung verallgemeinerbarer Aussagen über die Wirkungen des Einsatzes von PA auf verschiedene Nachhaltigkeitsindikatoren. Infolgedessen ist eine kohärente und integrative Nachhaltigkeitsbewertung von PA gegenwärtig schwierig. Anhand von Plausibilitätsüberlegungen können aber die Potenziale von PA-Anwendungen zur Verringerung wesentlicher Nachhaltigkeitsdefizite analysiert werden. Hierzu gehören: die Stickstoffüberschüsse, der Phosphatverbrauch und der Phosphateintrag in Oberflächengewässer, die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln, der Verbrauch fossiler Energieträger, die Beeinträchtigungen von Bodenfunktionen und der Verlust an Biodiversität. Bei den Auswirkungen von PA auf die ökonomisch und sozial nachhaltige Entwicklung der Landwirtschaft beschränken sich die Aussagen auf Einkommens- und Beschäftigungseffekte.

Die Stickstoffüberschüsse landwirtschaftlich genutzter Flächen stellen ein zentrales Nachhaltigkeitsdefizit der Landwirtschaft dar, da sie zu Belastungen des Naturhaushalts führen können. Um die Belastung von Grundwasser und Oberflächengewässern durch Stickstoffverbindungen zu verringern und die Reduktionsziele zu erreichen, ist ein effizienter Einsatz von Stickstoff erforderlich. Durch eine teilflächenspezifische mineralische Stickstoffdüngung kann die ausgebrachte Düngermenge bei konstanten oder erhöhten Erträgen verringert und so die Stickstoffeffizienz um 10 bis 15 Prozent verbessert werden. PA wird insgesamt jedoch nur in beschränktem Maße dazu beitragen können, die hohen Stickstoffsalden zu reduzieren, da diese hauptsächlich aus hohen, regional verdichteten Tierbeständen und einer schlechten Stickstoffnutzungseffizienz bei den dort anfallenden Wirtschaftsdüngern resultieren und bislang keine praxisrelevanten PA-Verfahren für die Ausbringung von Wirtschaftsdünger zur Verfügung stehen. Außerdem sind die Methoden zur Erfassung und Steuerung der Stickstoffmineralisierung im Boden in Abhängigkeit von Standort und klimatischen Faktoren noch unzureichend.

Die Ausbringung phosphathaltiger Düngemittel führt einerseits maßgeblich zur Reduzierung weltweit begrenzter Phosphatvorräte und andererseits zu nennenswerten Phosphoreinträgen in Oberflächengewässer. PA kann zur räumlichen Differenzierung der Phosphatdüngung und damit zum Abbau lokaler Phosphatüberschüsse beitragen. Die Probleme zu hoher Phosphatsalden treten insbesondere in Gebieten mit hohen Viehbesatzdichten und konzentriertem Aufkommen an Wirtschaftsdünger auf, während die flächenspezifischen Phosphatbilanzen reiner Ackerbaubetriebe überwiegend ausgeglichen sind. Verfahren zur teilflächenspezifischen Ausbringung von Wirtschaftsdünger sind derzeit aber noch wenig erforscht.

Die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (PSM) ist eine wichtige Maßnahme zur Sicherung der Erträge und der Nahrungsmittelqualität. Einige der PSM sind jedoch humantoxisch und andere bauen sich in der Umwelt nur langsam ab und können sich in der Nahrungskette anreichern. Des Weiteren kann die Ausbringung von PSM zu Umweltbelastungen führen, da sie durch Verwehungen, Verdunstung mit nachfolgendem Niederschlag oder durch Abdrift in benachbarte Biotope bzw. Oberflächengewässer sowie durch Versickerung ins Grundwasser gelangen können. Angesichts dieser Risiken beschloss die Agrarministerkonferenz vom März 2005, den Pflanzenschutzmittelaufwand in den nächsten zehn Jahren um 15 Prozent zu reduzieren (Agrarministerkonferenz 2005). Der Einsatz von PA im Pflanzenschutz kann die Erreichung dieses Reduktionsziels unterstützen. Gegenwärtig ist die Wirkung jedoch gering, weil der Umfang der Herbizidanwendung in Deutschland v. a. vom Getreideanbau (auf 59 Prozent der Ackerfläche) bestimmt wird. Für Getreide gibt es zwar in der Forschung entwickelte Verfahren zur teilflächenspezifischen Herbizidapplikation, diese sind jedoch noch nicht praxisreif. Für eine wirtschaftliche Anwendung von PA im Kampf gegen Pilzkrankheiten fehlen derzeit Methoden und Techniken zur raschen und kostengünstigen Erfassung der Schaderreger.

Grundsätzlich kann durch eine teilflächenspezifisch angepasste Bodenbearbeitung die Gefahr von Bodenerosion und Bodenverdichtung verringert werden. Die Vorteile eines Einsatzes von PA in der Bodenbearbeitung werden aber bisher nicht darin, sondern im Potenzial zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs gesehen. Verglichen mit Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung – in der Praxis etabliert zur Verringerung von Erosion, Bodenverdichtung und Verlust an organischer Bodensubstanz – sind die Effekte räumlich differenzierter Bodenbearbeitung als eher gering einzuschätzen. Unklar ist noch, ob positive Effekte der konservierenden Bodenbearbeitung (z. B. Förderung der Bodenfruchtbarkeit) durch den Einsatz von PA gesteigert werden könnten.

Die intensive Landnutzung der vergangenen Jahrzehnte trug maßgeblich zum Rückgang der Artenvielfalt in landwirtschaftlichen Gebieten bei. Auch die Agrobiodiversität ging dramatisch zurück. Die Einordnung von PA als Instrument zur nachhaltigen Entwicklung der Biodiversität ist schwierig. Technisch ist es zwar möglich, schützenswerte kleinräumige Bereiche in der Agrarlandschaft zu identifizieren und mit PA restriktiv zu bewirtschaften oder sie ganz aus der Nutzung zu nehmen. In der Praxis scheitert der Einsatz von PA zum Schutz von Biotopen jedoch daran, dass es methodisch problematisch ist, Teilflä-

chen bestimmte Schutzziele zuzuordnen. Grundsätzlich ist jedoch die Frage zu stellen, ob es nicht einfachere Wege gibt, um die Ziele erhöhter Lebensraumvielfalt und Artenvorkommen in der Agrarlandschaft zu erreichen.

Für die ökologische Dimension nachhaltiger Landbewirtschaftung lässt sich zusammenfassend festhalten, dass PA verschiedene Umweltentlastungspotenziale besitzt, diese aber begrenzt sind. Erstens ist die erforderliche PA-Technik für einen großflächigen Einsatz noch nicht verfügbar (z. B. PA-Verfahren zur Herbizidapplikation in Getreide, der wichtigsten Kulturpflanze in Deutschland), zweitens stehen die PA-Verfahren in Konkurrenz zu anderen Technologien (z. B. Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung) oder Bewirtschaftungsweisen (z. B. Ökolandbau) und drittens können die bestehenden Nachhaltigkeitsdefizite der Landwirtschaft nur teilweise durch den Einsatz moderner Technik behoben werden (z. B. Nährstoffüberschüsse aufgrund regional konzentrierter intensiver Tierhaltung).

Der Einsatz von PA kann zur Verbesserung der Einkommen in der Landwirtschaft beitragen, wenn die höheren monetären Leistungen bzw. die Potenziale zur Kostensenkung die Mehrkosten der Investitionen übersteigen. Eine verallgemeinernde Aussage über den Beitrag von PA zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und zur Sicherung der Existenzfähigkeit der Betriebe kann nicht getroffen werden, da die Rentabilität des PA-Einsatzes auf Betriebsebene von verschiedenen Faktoren abhängt. Tendenziell fallen die ökonomischen Vorteile des PA-Einsatzes jedoch umso deutlicher aus, je höher die Standortheterogenität und die Produktionsintensität sind. Der Einsatz von PA wird also am ehesten wirtschaftlich für Betriebe mit Fruchtfolgen, die einen hohen Anteil an intensiv angebauten Kulturpflanzen haben. Je nach Annahmen und PA-Anwendung wird die Rentabilitätsschwelle aber meist erst ab mehreren hundert Hektar Betriebsgröße (bzw. bewirtschafteter Fläche) erreicht. Diese Mindestnutzungsfläche verringert sich bei sinkenden Anschaffungskosten und steigenden Preisen für Betriebsmittel und landwirtschaftliche Erzeugnisse. Die Erzeugerpreise bewegen sich allerdings seit längerem auf einem niedrigen oder gar sinkenden Niveau und können daher wenig zur Refinanzierung der PA-Kosten beitragen. Wenn sich an diesen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nichts ändert oder keine speziellen Anreize für den PA-Einsatz geschaffen werden, kann man auch zukünftig nur von einer geringen Diffusion der PA-Technik ausgehen. Damit würden auch die positiven ökologischen Nachhaltigkeitseffekte von PA nur bescheiden ausfallen.

Aus Nachhaltigkeitssicht eher kritisch zu sehen sind die – wie bei vielen die Effizienz steigernden Techniken – langfristig arbeitsplatzmindernden Wirkungen von PA-Anwendungen (Stichwort: Feldrobotik). Da der Einsatz von PA mit zunehmender Betriebsgröße wirtschaftlicher wird, könnte eine verstärkte Nutzung dieser Technologie zu einer Beschleunigung des Strukturwandels in der Landwirtschaft führen. In den nächsten Jahren dürften PA-Anwendungen dagegen zu einem höheren Managementaufwand führen und somit mittelfristig zu einem leicht steigenden Arbeitskräftebedarf. Durch den mit PA-Anwendungen verbundenen Bedarf an Aus- bzw. Weiterbildungskapazitäten sowie „IT-Support“ bei Landwirten und Dienstleistern dürften nicht unerhebliche positive Arbeitsplatzeffekte verknüpft sein. Die Attraktivität eines modernen „High-Tech-Agrarmanagers“ könnte darüber hinaus positive Effekte auf die Beschäftigungssituation in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum haben.

VII. Handlungsmöglichkeiten und Einfluss der Agrarpolitik

Im Folgenden wird zunächst aufgezeigt, wo Forschungsbedarf im Bereich Technikentwicklung besteht, wobei die Schwerpunkte bei der Entwicklung von innovativen Offline- und Onlineverfahren zur Erfassung von Boden- und Pflanzenparametern liegen. Aufgrund der Besonderheiten des ökologischen Landbaus wird danach auf den speziellen Forschungsbedarf zur Entwicklung von PA-Anwendungen für den Ökolandbau eingegangen.

Der zweite Abschnitt dieses Kapitels beschäftigt sich mit dem Forschungsbedarf zur Verbesserung des Datenmanagements und der Entscheidungsfindung auf Betriebsebene (Kap. VII.2). Dabei wird auch der Einsatz von PA zur Erfüllung von Dokumentationspflichten diskutiert. Anschließend werden Forschungsfragen zur systemanalytischen Untersuchung und Bewertung von PA-Anwendungen aufgeworfen.

Im dritten Abschnitt wird der Einfluss agrarpolitischer Rahmenbedingungen auf die Verbreitung und Nutzung von PA diskutiert, und es werden mögliche Maßnahmen zur Förderung der Diffusion von PA in die Praxis beschrieben.

1. Forschungsbereich Technikentwicklung

Die Analyse der bisherigen Forschungsförderung (Kap. III.8) hat gezeigt, dass zahlreiche Einzelprojekte und einige Verbundprojekte zu PA auf nationaler, europäischer und außereuropäischer Ebene durchgeführt wurden und die Industrie in bestimmten Bereichen (z. B. auf dem Gebiet der automatischen Spurführung) ebenfalls in nennenswertem Umfang Forschung zu PA betreibt. Trotz der Forschungsanstrengungen und der erzielten Ergebnisse existieren beim teilflächenspezifischen Pflanzenbau noch verschiedene technische, fachliche und methodische Schwierigkeiten, die eine rasche und flächendeckende Praxiseinführung behindern.

Nachfolgend wird der Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich innovativer technischer PA-Systeme skizziert. Dieser gliedert sich in folgende Teilbereiche:

– Offlineverfahren zur Bodenanalyse,

– Onlineverfahren zur Stickstoffdüngung,

– Onlineverfahren zur Unkrautbekämpfung,

– Onlineverfahren zur Erkennung von Pilzkrankheiten,

– Onlineverfahren zur Qualitätsbestimmung bei Ernteprodukten.

Offlineverfahren zur Bodenanalyse

Die Erfassung von Bodenparametern mit dem Kartieransatz ist vielfach erprobt und prinzipiell praxisreif. Ihre breite Einführung in die Praxis scheitert jedoch an den hohen Kosten der verfügbaren (aufwendigen) Methoden der Bodenbeprobung und -analyse. Die Entwicklung von Verfahren der vereinfachten Bodenanalyse sollte v. a. deshalb gefördert werden, weil hierdurch ein effizienter Umgang mit Düngemitteln erreicht und insbesondere die Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Ausbringung von Grunddünger verbessert werden kann. Neben den direkten Messungen an Bodenkenngrößen gibt es Forschungsansätze zu nicht invasiven Methoden, die eine Charakterisierung der Teilflächen hinsichtlich pflanzenbaulicher Standorteigenschaften ermöglichen. Diese werden voraussichtlich u. a. auf Fernerkundungsdaten, kartierten Daten und Onlinesensorsystemen basieren.

Onlineverfahren zur Stickstoffdüngung

Die zeitnahe automatische Datenerfassung mit Onlineverfahren (Sensoransatz) ermöglicht eine Datenerhebung mit einem deutlich geringeren Zeitaufwand als manuelle Bonituren oder aufwendige Laboruntersuchungen. Die teilflächenspezifische mineralische Stickstoffdüngung mit Onlineverfahren ist technisch relativ weit entwickelt und wird in der Praxis mit steigender Tendenz angewendet. Allerdings ist es mit den verfügbaren optoelektronischen Sensorsystemen nicht möglich, bei der Erfassung des Stickstoffzustands der Pflanze andere Einflussgrößen und Störfaktoren zu erfassen und zu eliminieren. Bei der Weiterentwicklung von Sensorsystemen zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung sollte demnach ein Schwerpunkt auf der Berücksichtigung anderer Einflüsse (z. B. Wasserversorgung der Kulturpflanzen) und Störgrößen (z. B. ungünstige Belichtungsverhältnisse durch Wolken) auf die mit Sensoren erfassbaren Pflanzenparameter liegen. Weitere Forschungsanstrengungen sind erforderlich, um die Interaktionen und Wirkungen verschiedener Einflussgrößen, wie z. B. Pilzbefall oder Trockenstress, auf die von manchen Sensorverfahren erfasste Chlorophyllfluoreszenz zu analysieren.

Onlineverfahren zur Unkrautbekämpfung

Die entwickelten Onlineverfahren zur teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung arbeiten mit optoelektronischen Sensoren (z. T. in Verbindung mit Bildanalysetechniken), die in Kombination mit einer gezielt steuerbaren Herbizidapplikationstechnik (z. B. Spot-Spraying-Technik) eine zeitnahe, räumlich differenzierte und selektive Bekämpfung von Unkräutern ermöglichen. In Kulturen mit weiten Reihenabständen (z. B. Mais) kann dieses Verfahren eingesetzt werden. In Kulturen mit engem Reihenabstand (z. B. Getreide) besteht dagegen noch Forschungsbedarf zur Entwicklung geeigneter Sensoren, die in der Reihe einerseits zwischen Kultur- und Unkrautpflanzen und andererseits zwischen verschiedenen Unkräutern und Ungräsern unterscheiden können. Dafür geeignete Systeme, die mehr als zwei verschiedene Wellenlängen des Lichts nutzen, befinden sich in der Entwicklung, sind aber für eine Herbizidapplikation in Echtzeit noch nicht marktreif.[38]

Onlineverfahren zur Erkennung von Pilzkrankheiten

Die Ausbreitung von pflanzlichen Pilzkrankheiten wird durch verschiedene Faktoren bestimmt, die zum einen die Anfälligkeit der Pflanzen, zum anderen die Vermehrung der Pilze beeinflussen. Entsprechend komplex und langwierig gestaltet sich die Entwicklung von Verfahren zur teilflächenspezifischen Erkennung und Bekämpfung von Pilzkrankheiten, die sich gegenwärtig noch in einem frühen Forschungsstadium befindet. Wichtige Meilensteine, die bei der Entwicklung von PA-Verfahren zur selektiven Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten noch erreicht werden müssen, sind die eindeutige automatisierte Erkennung von Pilzbefall im Anfangsstadium und der Aufbau praktikabler Entscheidungsmodelle zur Fungizidapplikation. Um diese zu erreichen, sind große Forschungsanstrengungen erforderlich.

Zur Identifizierung von Pilzbefall mittels Sensoren gibt es augenblicklich verschiedene interessante Forschungsansätze. Ein Ansatz besteht in der Aufnahme der bei einer Pilzinfektion – aber auch unter anderen Stressbedingungen – verstärkten Chlorophyllfluoreszenz mit Hilfe von fahrzeuggestützten Lasersystemen. Alternativ dazu wird versucht, anhand der Analyse von Multispektralbildern Pilzbefall auf der Blattoberfläche zu erkennen. Eine weitere Forschungsrichtung prüft die Möglichkeit, über die Messung der Oberflächentemperatur der Blätter einen Hinweis auf einen Krankheitsbefall zu erhalten. Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht abschätzbar ist, welcher der Ansätze erfolgreich bis zur Praxisreife entwickelt werden kann, sollten zunächst alle drei Forschungsrichtungen weiter untersucht, aber auch für andere, nicht optische Verfahren entsprechende Such- und Entwicklungsforschung ermöglicht werden.

Onlineverfahren zur Qualitätsbestimmung bei Ernteprodukten

Die Qualität von Ernteprodukten (z. B. der Proteingehalt von Weizen) kann für verschiedene Kulturen (z. B. Getreide, Raps und Feldfutter) während der Ernte mittels der Nahinfrarot-Reflexionsspektroskopie (NIRS)[39] erfasst und darauf aufbauend können teilflächenspezifische Produktqualitätskarten erstellt werden. Für eine breite Anwendung dieses Verfahrens in der Praxis bedarf es jedoch noch der Erarbeitung von einfachen und zuverläs-

[38] Nach rund siebenjähriger Entwicklungszeit ist von der FAL (gefördert durch ein BMBF-Verbundprojekt) ein erster Prototyp „Advanced Optoelectronic System (AOS)“ entwickelt worden, der mittels fotooptischer Sensoren bei geeigneten Wellenlängen verschiedene Unkräuter und Ungräser voneinander und diese von den Kulturpflanzen unterscheiden kann (BMBF 2004). Ebenso sind kamerabasierte Systeme durch die Universität Bonn bis zur Praxisreife entwickelt worden (Gebhardt/Kühbauch 2005).

[39] Diese Methode hat sich in den letzten Jahren im Labor als Standard zur Analyse von Inhaltsstoffen durchgesetzt.

sigen Methoden zur Kalibrierung der Messeinrichtungen auf den Erntemaschinen.[40] Weitere Forschungsanstrengungen sind erforderlich, um die Zusammenhänge zwischen pflanzenbaulichen Maßnahmen (z. B. die Ausbringung von Düngemitteln) und der dadurch erzielbaren Qualität der Ernteprodukte (z. B. den Proteingehalt im Korn) besser als bislang verstehen und nachbilden zu können.

PA-Anwendungen im ökologischen Landbau

Der ökologische Landbau wird in bestimmten Anwendungsgebieten von den Ergebnissen und Entwicklungen der PA-Forschung profitieren können, die gegenwärtig auf die Anforderungen der konventionellen Landwirtschaft ausgerichtet sind. Betrachtet man die Möglichkeiten eines PA-Einsatzes im Ökolandbau, kommen grundsätzlich nur bestimmte Anwendungsfelder in Betracht. Dies hängt im Wesentlichen mit den Grundprinzipien des Ökolandbaus zusammen, insbesondere mit dem limitierten Einsatz von systemexternen Betriebsmitteln. Angesichts dieser Restriktionen ist der Ökolandbau v. a. an PA-Verfahren zur teilflächenspezifischen Ausbringung von Wirtschaftsdünger und zur teilflächenspezifischen mechanischen oder thermischen Unkrautregulierung interessiert.

Wenngleich beim Pflanzenschutz im Ökolandbau vorbeugende Maßnahmen im Mittelpunkt stehen, könnte für ihn auch der Einsatz von PA-Verfahren zur selektiven Wirkstoffausbringung nützlich sein. Ein Beispiel: Der Befall mit Kraut- und Knollenfäule (Phytophthora infestans) in Kartoffelbeständen ist im Ökolandbau ein großes Problem und die einzige Möglichkeit, den Befall kurativ zu regulieren, stellt die Anwendung von Kupferpräparaten dar. Der Einsatz von Kupfer ist jedoch problematisch, weshalb es nur in begrenzten Mengen ausgebracht werden darf. Eine frühe Erkennung des Befalls und eine teilflächenspezifische Behandlung wären wünschenswert, weil so die Ausbringmenge und die damit verbundenen negativen Auswirkungen auf den Naturhaushalt verringert werden könnten. Ein Ansatz hierzu stellt die Entwicklung eines olfaktorischen Biosensors (aus Antennen von Kartoffelkäfern) dar, der verletzungsbedingte Emissionen von Kartoffelpflanzen detektieren kann, wie sie bei einem Phytophthorabefall auftreten. Auf der Basis so erstellter Befallskarten ist eine teilspezifische Applikation von Kupferpräparaten möglich. Die Forschung zur teilflächenspezifischen Erkennung und Behandlung von Pilzkrankheiten steht allerdings noch am Anfang.

Durch die teilflächenspezifische Ausbringung von Wirtschaftsdünger unter Berücksichtigung heterogener Nährstoffverteilung und standortspezifischer Umsetzungsprozesse im Boden könnte die Düngereffizienz im Ökolandbau weiter verbessert werden. Die Entwicklung von PA-Techniken zur standort- und bestandsgerechten Ausbringung organischer Dünger ist bislang jedoch nicht ausreichend Gegenstand der Forschung. Hier sollte eine entsprechende Grundlagenforschung zur Entwicklung von Verfahren und Techniken zur besseren Nutzung organisch gebundener Nährstoffe initiiert werden. Die Forschung steht hier vor der komplexen Herausforderung, Modelle zu entwickeln, die in der Lage sind, die optimale Düngermenge unter Berücksichtigung der Nährstoffverfügbarkeit bzw. -freisetzung aus Dünger und Bodenvorrat sowie der Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen (in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf) zu analysieren. Bei der teilflächenspezifischen Ausbringung von Festmist besteht darüber hinaus eine technische Herausforderung in der Verbesserung der Verteilgenauigkeit. Mit der Entwicklung entsprechender PA-Verfahren zur Ausbringung von Wirtschaftsdünger ist – vorausgesetzt es kommt zu entsprechenden Forschungsaktivitäten – also erst mittel- bis langfristig zu rechnen. Angesichts der Bedeutung organischer Dünger für die Nährstoffversorgung der Pflanzen nicht nur im Ökolandbau und der mit ihrer Ausbringung verbundenen Umweltrisiken erscheinen Forschungsanstrengungen in diesem Bereich jedoch als besonders wichtig.

2. Forschungsbereich Datenmanagement, Entscheidungsfindung, Dokumentation und Systemanalyse

In diesem Abschnitt werden Forschungsaufgaben aufgezeigt, deren Lösung zu Verbesserungen im Datenmanagement und in der Entscheidungsfindung führen kann. Anschließend wird auf den Einsatz von PA zur Erfüllung von Dokumentationspflichten und zur Gewährleistung der Rückverfolgbarkeit eingegangen. Abschließend wird der Forschungsbedarf zur Analyse der Folgewirkungen von PA auf sektoraler Ebene und zur Einordnung von PA in den Kontext nachhaltiger Entwicklung der Landwirtschaft aufgezeigt.

Datenmanagement

Ein grundsätzliches Problem der praktischen Anwendung von Offlineverfahren (Kartieransatz) ist der Umgang mit großen Datenmengen. Durch die kombinierte Nutzung von mit Offline- und Onlineverfahren (Sensortechnik) erfassten Daten steigen die Anforderungen an Datenverwaltung und Entscheidungsfindung. Zum effektiven Management der Daten über die gesamte Pflanzenproduktion eines Betriebes sollten einfache, praxistaugliche Methoden und Verfahren erarbeitet werden. Daneben sind die vorhandenen Hard- und Softwarelösungen für den Einsatz von PA weiterzuentwickeln mit dem Ziel, die Nutzung verschiedener PA-Anwendungen effektiver und bedienerfreundlicher zu machen. Ein Teil der aufgezeigten Forschungsfragen wird im laufenden BMBF-Forschungsprojekt preagro II behandelt.

Modelle zur Entscheidungsunterstützung

Zur besseren Umsetzung der mit PA-Verfahren erfassten Boden- und Pflanzenparameter in teilflächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen bedarf es der Weiterentwicklung von Modellen zur Entscheidungsfindung. Die

[40] Mit dem Aufbau einer umfassenden Kalibrierungsdatenbank für die Inhaltsstoffe der wichtigsten Futterpflanzen ist bereits begonnen worden.

Modelle sollten flexibel und transparent sein und eine strategische Planung der pflanzenbaulichen Maßnahmen bei unterschiedlichen Produktionsbedingungen und -zielen ermöglichen. Dabei besteht insbesondere Forschungsbedarf bei der Interpretation der erfassten Daten und deren Umsetzung in Entscheidungsregeln auf Basis von Algorithmen, die die Abläufe und Wechselwirkungen in der Natur hinreichend genau abbilden. Die Umsetzung teilflächenspezifisch erfasster Daten in konkrete Entscheidungshilfen scheiterte in der Vergangenheit auch daran, dass die Wirkungen unterschiedlicher Standorteigenschaften – in Wechselwirkung mit den Produktionsfaktoren – auf die Bestandsentwicklung und den Ertrag nicht hinlänglich bekannt sind. Ein Schwerpunkt bei der Erforschung von Modellen zur Entscheidungsunterstützung sollte deshalb auf die Entwicklung von Produktionsfunktionen gelegt werden, die an standortspezifische Besonderheiten angepasst werden können. Ziel der Forschung sollte es auch sein, Modelle zur Erstellung von Sollwert- bzw. Applikationskarten zu entwickeln, die hinreichend genau und kostengünstig produzierbar sind.

Die Betriebsmitteleinsparungen beim Einsatz von PA sind u. a. auch das Ergebnis verringerter Sicherheitszuschläge seitens der Landwirte. Grund hierfür sind die mittels PA verfügbaren zusätzlichen zeitnahen Informationen über den Pflanzenbestand. Um dieses Reduktionspotenzial noch besser ausschöpfen zu können, sollten praktikable Methoden zur Risikoabschätzung bei der Durchführung bzw. Unterlassung spezifischer Bewirtschaftungsmaßnahmen (z. B. Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln) entwickelt werden. Insgesamt sollte großer Wert auf die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der entwickelten Modelle zur Entscheidungsunterstützung und zur Steuerung der Applikationstechnik gelegt werden, da dies für die Akzeptanz der Systeme bei den Landwirten von großer Bedeutung ist.

Dokumentationspflicht und Rückverfolgbarkeit

Die detaillierte Aufzeichnung von produktionstechnischen Maßnahmen und Betriebsabläufen ist zeitaufwendig und erfordert eine gute Organisation bei der Datenverwaltung. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt führen viele Landwirte ihr eigenes Dokumentationssystem entweder handschriftlich oder als (elektronische) Ackerschlagkartei. Neue Rechtsvorschriften, wie z. B. die Erweiterung des Lebensmittel- und Produkthaftungsrechts auf Agrarprodukte oder die Direktzahlungsverpflichtungen der Agrarreform im Zusammenhang mit Cross Compliance, führen zu einem erhöhten Dokumentationsaufwand. Insbesondere die zum 1. Januar 2005 in Kraft getretene EU-Verordnung 187/2002 mit dem generellen Gebot der durchgängigen Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln verpflichtet alle in der Kette der Lebensmittelerzeugung tätigen Unternehmen – also auch die Landwirte – zur genauen Dokumentation aller relevanten Maßnahmen. Der Landwirt muss dokumentieren, welche Betriebsmittel von welchem Lieferanten gekauft, welche Maßnahmen innerhalb der einzelnen Produktionszweige des landwirtschaftlichen Betriebes durchgeführt und an wen die Produkte verkauft wurden.

Inwieweit neue, automatisch aufzeichnende Verfahren erforderlich sind, um die umfassenden Nachweis- und Aufzeichnungspflichten der Landwirte effizient und beherrschbar zu gestalten, ist schwierig zu beantworten. Unklar ist auch die zukünftige Rolle von PA in diesem Kontext. Es sollte deshalb untersucht werden, ob PA ein geeignetes Instrument darstellen könnte, um die zukünftig voraussichtlich weiter steigenden Anforderungen an die Dokumentationspflichten in der Landwirtschaft – z. B. sieht der aktuelle Vorentwurf für eine neue Düngeverordnung feldbezogene Aufzeichnungs- und Bilanzierungsvorschriften für Stickstoff und Phosphat vor – einfach und sicher zu erfüllen.

Analyse der Folgewirkungen und Nachhaltigkeitseffekte

Verallgemeinernde Aussagen zu den Auswirkungen von PA und ihrer Bewertung anhand von Nachhaltigkeitskriterien sind auf der Basis des gegenwärtigen Kenntnisstands nur unter Vorbehalten möglich. Dies hängt einerseits damit zusammen, dass die Effekte von PA-Anwendungen bislang nur in technologiespezifischen Einzeluntersuchungen erforscht wurden und meist nur auf ganz bestimmte Kenngrößen (z. B. Betriebsmitteleinsparung) und Kulturarten begrenzt sind. Andererseits liegt es daran, dass es keine Untersuchungen gibt, in welchen Regionen Deutschlands aufgrund von feldinternen Standortheterogenitäten und entsprechenden Betriebsstrukturen mit nennenswerten positiven Effekten durch PA-Anwendungen zu rechnen ist. Hier sind entsprechende Forschungsaktivitäten erforderlich. Zusätzlicher Forschungsbedarf besteht bei der Entwicklung von Szenarien zum Einsatz von PA (in Deutschland und in der EU) unter zukünftigen agrarpolitischen Rahmenbedingungen und zur Abschätzung der damit verknüpften ökonomischen, agrarstrukturellen, ökologischen und sozialen Folgewirkungen auf sektoraler Ebene. Die aufgezeigten Forschungsfragen werden in laufenden Forschungsvorhaben, wie z. B. dem BMBF-Forschungsprojekt preagro II, nicht hinreichend behandelt.

Ein weiteres Forschungsfeld stellt die Einordnung von PA in den Kontext nachhaltiger Entwicklung dar. Zur diesbezüglichen Bewertung von PA bedarf es der Weiterentwicklung von Methoden und Verfahren zur umfassenden Analyse der Wirkungen von PA auf Nachhaltigkeitsindikatoren vor dem Hintergrund zukünftiger Entwicklungen und Rahmenbedingungen. Besonders dringender Forschungsbedarf besteht dabei bei der Identifizierung und Entwicklung geeigneter Kenngrößen, Ziele und Indikatoren zur Operationalisierung der ökonomischen und sozialen Dimension nachhaltiger Landwirtschaft. Darüber hinaus gibt es Forschungsbedarf im Blick auf die Analyse von Zielkonflikten innerhalb des Nachhaltigkeitskonzeptes und bei der Entwicklung von Strategien zum Umgang mit Zielkonflikten.

3. Einfluss agrarpolitischer Rahmenbedingungen

Der zusätzliche Kapitalbedarf für PA-Anwendungen, dem zurzeit nur in bestimmten Fällen ein entsprechender

Mehrerlös gegenüber steht, ist ein wesentlicher Grund dafür, dass die Akzeptanz und Diffusion von PA in Deutschland bislang deutlich hinter den Erwartungen zurückbleibt. Die Höhe des Mehrerlöses wird einerseits von den eingesparten Betriebsmittelmengen oder Ertragssteigerungen – die überdies von der Produktionsintensität abhängen – und andererseits von den jeweiligen Preisen für die betreffenden Betriebsmittel und Agrarprodukte beeinflusst.

Die landwirtschaftliche Produktion in Deutschland wird heute weitgehend durch die EU-Agrarpolitik bestimmt. Diese vollzieht gerade einen grundlegenden Systemwechsel mit weitreichenden Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der landwirtschaftlichen Erzeugung. Sie trägt so den aktuellen Herausforderungen wie der EU-Erweiterung, den WTO-Verhandlungen zur weiteren Liberalisierung des Welthandels sowie der Wahrung der gesellschaftlichen Akzeptanz der Direktzahlungen an die Landwirtschaft Rechnung (BMVEL 2005, S. 7). Anstelle produktbezogener Flächenprämien erhalten die Landwirte ab 2005 von der Produktion nahezu vollständig abgekoppelte finanzielle Direktbeihilfen. Durch die Verknüpfung der Direktzahlungen mit der Einhaltung von Standards u. a. des Umwelt- und Tierschutzes, sowie der Lebens- und Futtermittelsicherheit (Cross Compliance) wird deutlich, dass die Direktzahlungen zunehmend zu einem Entgelt für die von der Gesellschaft gewünschten und von der Landwirtschaft zu erbringenden bzw. erbrachten Leistungen ausbaut werden.

Durch die Entkopplung der Direktzahlungen von der Produktion werden sich die Preise für nahezu alle Agrarprodukte zukünftig stärker nach den Angebots- und Nachfrageverhältnissen auf dem Weltmarkt richten. Aufgrund des Überangebots an Nahrungsmitteln auf dem Weltmarkt im Hinblick auf die Verteilung der Kaufkraft und der starken Konzentration und Marktmacht im nationalen und internationalen Lebensmittelhandel wird mittelfristig tendenziell von weiter niedrigen oder gar sinkenden Preisen für Agrarprodukte (insbesondere für Milch, Roggen, Zucker, Rindfleisch) ausgegangen.

Ob die Preise für Betriebsmittel gleichfalls sinken werden, ist angesichts der derzeit stark steigenden Energiepreise eher zweifelhaft. Mittelfristig dürften die meisten Vorleistungen und Betriebsmittel – insbesondere die energieintensiven Produkte – deutlich teurer werden. Sinkende Produktpreise bei gleich bleibenden oder gar steigenden Faktorpreisen erhöhen den Leistungs- und Rationalisierungsdruck auf die landwirtschaftlichen Unternehmen. Die Landwirte können auf diesen Druck durch Extensivierung der Produktion – zur Reduktion der variablen Kosten –, Verzögerung von Investitionen, Diversifikation der Produktion, Erschließung neuer Wege zur Einkommenserzielung (z. B. nachwachsende Rohstoffe für Biogasanlagen) oder Betriebsvergrößerung – um Skaleneffekte zu nutzen – reagieren.

Eine generelle Extensivierung der Produktion als Folge sinkender Erzeugerpreise bzw. Einkommen konnte in der Vergangenheit ebenso wenig beobachtet werden wie eine zunehmende Diversifikation der Produktion – im Gegenteil: die Betriebe haben sich noch stärker spezialisiert – und wird auch mittelfristig eher nicht erwartet. Die Auswirkungen der Entkopplung und des sich zukünftig eher verschlechternden Preis-Kosten-Verhältnisses in der Pflanzenproduktion auf konkrete betriebsspezifische Produktionsstrukturen und Produktionsintensitäten hängen entscheidend von den jeweiligen Produktionsbedingungen, insbesondere von den Klima- und Bodenverhältnissen, ab. Beispielsweise werden Marktfruchtbaubetriebe, die vor der Entkopplung Bullen gehalten haben, ceteris paribus die Bullenmast reduzieren und vermehrt Marktfrüchte anbauen bzw. schlechte Ackerböden „mulchen“, während reine Marktfruchtbaubetriebe auf Agrarstandorten mit hoher Produktivität wahrscheinlich die grundlegenden Bewirtschaftungsprinzipien und Produktionsintensitäten zukünftig weitestgehend beibehalten werden.

Bei den Überlegungen zur Entwicklung des Preis-Kosten-Verhältnisses in der Pflanzenproduktion und deren Folgen ist zu berücksichtigen, dass sich dieses zukünftig durch Weiter- und Neuentwicklungen verändern kann. Vor dem Hintergrund eines anhaltenden züchterischen und technischen Fortschritts sowie eines wirksameren Technikeinsatzes wird mit kontinuierlichen Ertragssteigerungen der wichtigsten Kulturpflanzenbestände von mindestens 2 Prozent jährlich gerechnet (Brown 1997, nach Werner/Christen 2004). Höhere Erträge können in Verbindung mit einer zumindest gleich bleibenden oder gar steigenden Effizienz der landwirtschaftlichen Produktion – z. B. durch den Einsatz von PA – dazu beitragen, die Kosten der landwirtschaftlichen Produktion zu verringern. Auch deshalb erscheint es ungewiss, ob niedrige Erzeugerpreise und steigende Betriebsmittelpreise langfristig zu einer Begünstigung eher extensiver Produktionsverfahren führen werden und auf ungünstigen Produktionsstandorten die landwirtschaftliche Nutzung aufgegeben oder durch Landschaftspflegemaßnahmen ersetzt wird.

Insgesamt scheint es jedoch derzeit einen Trend zu geben hin zu landwirtschaftlichen Produktionsverfahren mit einem reduzierten Einsatz an Arbeit, Kapital und Betriebsmitteln, insbesondere durch Nutzung (neuer) arbeitssparender Verfahren und Technologien sowie eine effektive Auslastung der vorhandenen Gerätetechnik. In der Pflanzenproduktion werden Einsparungspotenziale hauptsächlich bei der Bodenbearbeitung (z. B. konservierende Bodenbearbeitung) und Erntetechnik gesehen. Die landwirtschaftlichen Betriebe werden angesichts der Unsicherheit über die weitere Entwicklung der Erzeuger- und Betriebsmittelpreise außerdem versuchen, Kosten dadurch einzusparen, dass sie auf Investitionen vorerst verzichten oder sie auf einen späteren Zeitpunkt verschieben. Experten rechnen mit einem allgemein sinkenden Investitionsvolumen auch bei steigender Betriebsgröße. Allerdings gibt es Bereiche wie den Pflanzenschutz, in denen aufgrund gesetzlicher Auflagen die Investitionen durch teurer werdende Maschinen auch steigen können. Die Taktik, Investitionen einzusparen, ist jedoch ein riskanter Weg, da sich die langfristige Wettbewerbsfähigkeit der Betriebe eher verschlechtert, wenn Investitionen zu oft aufgeschoben werden.

Ein anderer Weg, die Produktionskosten zu senken, besteht darin, die bewirtschaftete Fläche pro Arbeitskraft zu steigern, z. B. durch den Einsatz von Geräten mit höherer Leistungsfähigkeit und eine Vergrößerung der bewirtschafteten Fläche. Allerdings kann die Agrarreform durch die Gewährung von Flächenprämien zu einer Verlangsamung des Strukturwandels in der Landwirtschaft führen und eine rasche Vergrößerung der Bewirtschaftungsfläche behindern.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die skizzierten Unsicherheiten über die zukünftige Entwicklung der Preise für Agrarprodukte und Betriebsmittel (sowie Pachtflächen) gegenwärtig viele Betriebe davon abhalten, in neue Techniken wie PA zu investieren, da diese einen zusätzlichen Kapitaleinsatz und anfänglich einen erhöhten Managementaufwand erfordern und in erster Linie zu einem effizienteren Umgang mit Betriebsmitteln, aber nur bedingt zur raschen Verbesserung der Betriebseinkommen beitragen können. Mit der Agrarreform verschlechtern sich somit teilweise die Voraussetzungen für eine rasche und breite Diffusion von PA in die landwirtschaftliche Praxis. Andererseits könnte der Einsatz von PA als informationsgeleitetes Managementsystem zukünftig auf stärkeres Interesse bei den Landwirten stoßen, weil sie zur Analyse, Entscheidungsfindung und Gestaltung pflanzenbaulicher Maßnahmen eingesetzt werden kann und so Kostensenkungs- und Ertragssteigerungspotenziale identifiziert und realisiert werden könnten. Des Weiteren könnten PA-Techniken auch in arbeitssparende, extensivere Anbauverfahren (z. B. teilflächenspezifische Bearbeitungsintensität oder -tiefe bei der konservierenden Bodenbearbeitung) integriert werden, was bei ausreichend niedrigen Anschaffungspreisen zu wirtschaftlichen Vorteilen insbesondere für große Betriebe führen kann. Wenn außerdem zukünftig PA-Techniken angeboten würden, die weitestgehend eine Automatisierung der PA-spezifischen Arbeitsabläufe gewährleisten, so können diese Techniken auch unter zunehmendem Wirtschaftlichkeitsdruck und wachsenden Anforderungen an Umweltschutz und Dokumentation für mehr landwirtschaftliche Betriebe wirtschaftlich interessant werden.

4. Förderung der Anwendung und Diffusion von Precision Agriculture

Während im Industrie- und Dienstleistungssektor die Einführung von Navigationssystemen zu neuen wirtschaftlichen Impulsen führte, ist seit der Einführung des PA-Konzeptes in der Landwirtschaft vor rund zehn Jahren die Verbreitung teilflächenspezifischer Landbewirtschaftung immer noch recht unbedeutend. Die Hauptursache hierfür ist die problematische Beurteilung der Wirtschaftlichkeit, auch bedingt durch die niedrigen bzw. sinkenden Preise für landwirtschaftliche Erzeugnisse. Wenn sich an diesen Rahmenbedingungen nichts ändert (oder keine speziellen Anreize geschaffen werden), kann man auch zukünftig nur von einer geringen Diffusion der PA-Technik ausgehen. Damit würden auch die erzielbaren positiven Nachhaltigkeitseffekte (insbesondere im Pflanzenschutz und bei der Düngung) von PA nur bescheiden ausfallen.

Nachfolgend werden verschiedene Wege aufgezeigt, wie die Diffusion von PA-Anwendungen durch Maßnahmen der öffentlichen Hand gefördert werden könnte. Dabei sollten auch noch offene Forschungsfragen beantwortet werden und in der gesellschaftspolitischen Bewertung weitgehend Konsens darüber erzielt werden, dass der Einsatz von PA einen Weg zur nachhaltigen Entwicklung der Landwirtschaft darstellt.

Eine Möglichkeit, die Diffusion von PA zu unterstützen, besteht darin, die Markteinführung durch einen Investitionszuschuss für innovative Produktionsverfahren zu fördern. Nach einer breiten Etablierung von PA am Käufermarkt sind signifikante Kostensenkungen durch Serienproduktionen von PA-Techniken mit ausreichend hohen Stückzahlen denkbar. In der Folge könnte sich dann ein Preisniveau einstellen, das in Relation zum erwarteten Nutzen eine selbsttragende weitere Marktdurchdringung ermöglicht. Auf der anderen Seite können sowohl Maßnahmen zur Verteuerung umweltbelastender Betriebsmittel als auch entsprechende Vorschriften zum Umgang mit diesen Betriebsmitteln bzw. zur räumlich und zeitlich differenzierten Dokumentation der Maßnahmen zu einer Förderung der Anwendung von PA in der betrieblichen Praxis führen.

Ein anderer Weg, die Einführung, Verbreitung und Etablierung von PA-Techniken zu fördern, stellen Pilotprojekte in der landwirtschaftlichen Praxis dar. Dabei wäre darauf zu achten, dass bei einer Eignung des Verfahrens nach Abschluss der Pilotprojekte die Fortführung der geförderten Wirtschaftsweise in den Betrieben gewährleistet ist. Von großer Bedeutung für eine Ausbreitung der Anwendung von PA ist die öffentlichkeitswirksame Verbreitung relevanter Erfahrungen mit PA-Anwendungen, so dass diese von weiteren Betrieben übernommen werden können. Um die Zukunftsaussichten von PA-Techniken mittel- bis langfristig zu verbessern, sollte die Wissensvermittlung über PA nicht auf Betriebsebene beschränkt bleiben. Das Wissen über PA sollte in der Meisterausbildung und der studentischen Ausbildung an Hochschulen fest verankert werden. Dies ist bereits an einigen Lehreinrichtungen in Deutschland (z. B. TU München, Humboldt-Universität zu Berlin, FH Neubrandenburg) verwirklicht worden.

Auch im Bereich der landwirtschaftlichen Beratung und Weiterbildung besteht Handlungsbedarf zur Förderung der Kenntnisse über PA. Um PA praktizieren zu können, müssen zum Teil neue Kenntnisse erworben werden. Dies betrifft das pflanzenbauliche Wissen, Managementformen, die Bedienung von Geräten und Sensoren sowie den Umgang mit immer leistungsfähiger werdender Software. Mit der Förderung von zielgerichteten, regional organisierten Qualifizierungsmaßnahmen könnte eine wirksame Unterstützung zum Wissenstransfer geleistet werden.

Ein weiteres Verfahren zur aktuellen und entgeltfreien Vermittlung von Information über PA ist das Internet. Hier können eine Vielzahl an Informationen auf einer Plattform gebündelt und für jedermann zugänglich bereitgestellt werden. Die Förderung eines Informationssystems PA im Internet wäre ein wirkungsvoller Beitrag zur Förderung und Verbreitung des PA-Wissens in der Praxis.

Literatur

1. In Auftrag gegebene Gutachten

Ehlert, D., Dammer, K.-H., Domsch, H., Kramer, E., Langner, H.-R., Schwarz, J. (2004): Stand und Perspektiven von Precision Agriculture-Techniken. Institut für Agrartechnik Bornim (ATB)

Strecker, O. A., Heißenhuber, A., Gandorfer, M., Kliebisch, C., Meyer-Aurich, A. (2004a): Ökonomische Aspekte von Precision Agriculture. AFC Consultants International GmbH, Bonn/Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaus, TU München, Freising-Weihenstephan

Strecker, O. A., Heißenhuber, A., Gandorfer, M., Kliebisch, C., Meyer-Aurich, A. (2004b): Auswirkungen von Precision Agriculture auf Natur und Umwelt. AFC Consultants International GmbH, Bonn/Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaus, TU München, Freising-Weihenstephan

Werner, A., Christen, O. (2004): Einordnung von Precision Agriculture in Strategien zur Erreichung einer nachhaltigen Landwirtschaft. Müncheberg, Markkleeberg

2. Weitere Literatur

Agrarministerkonferenz (2005): Top 5.1: Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz. In: Ergebnisprotokoll der Agrarministerkonferenz am 4. März 2005 auf dem Petersberg/Königswinter. http://www.agrarministerkonferenz.de (Zugriff Juli 2005), S. 32–33

Agroscope (2004): Wirkungsgrad von Phosphat und Stickstoff. In: Medieninfo aus der Landwirtschaftlichen Forschung, Nr. 01 vom 4. März 2004, Bundesamt für Landwirtschaft, Bern, S. 2

Alsing, I. (Hg.) (1993): Lexikon Landwirtschaft. 2. Auflage, München

Ancev, T., Whelan, B., McBratney, A. (2004): On the economics of Precision Agriculture: technical information and environmental aspects. In: Proceedings of the Annual Conference of the Australian Agricultural and Resource Economics Society (AARES), Contributed Papers, Melbourne

Anonym (1976): Global 2000 – Der Bericht an den Präsidenten. 12. Auflage 1981, Frankfurt a. M.

Anonym (2001): Precision Farming im Pflanzenschutz am Beispiel Unkrautbekämpfung. KTBL-Schrift 402, Darmstadt

Anonym (2002): Third UN/USA Workshop on the use and applications of Global Satellite Navigation Systems, for the benefit of Latin America and the Caribbean. http://www.oosa.unvienna.org/SAP/act2002/chile_info_e.html (Zugriff September 2005)

Anonym (2003): The challenge and the response. http://www.newindpress.com/budget/2003/uNews.asp?Topic=217&Title=Overview&ID=IEL20030228093208&nDate=2/28/2003&Sub= (Zugriff August 2005)

Anonym (2004): Öko-Landbau fördert Biodiversität – Umfangreiche Studie bestätigt Vorteile nachhaltiger Landwirtschaft. http://www.innovations-report.de/html/berichte/agrar_forstwissenschaften/bericht-34702.html (Zugriff November 2005)

Anonym (2005a): „Sehende Feldspritze“. In: BW agrar 32/2005, S. 26

Anonym (2005b): Nur gemeinsam eine Chance. Auch auf Handtuchschlägen kann sich Precision farming rechnen. In: BW agrar 48/2005, S. 8–9

Anonym (2005c): Kalam for second green revolution. http:/www.financialexpress.com/print.ph?content_id=111930 (Zugriff Dezember 2005)

Anonym (2005d): Precision Farming. http://www.gis-development.net/application/agriculture/pfarm/index.htm (Zugriff Dezember 2005)

Anonym (2005e): CAR research grant for PAU. http://cities.expressindia.com/fullstory.php?newsid=160312 (Zugriff September 2005)

Auernhammer, H. (2002): The role of mechatronics in crop product traceability. In: CGIR Journal of Scientific Research and Development October, S. 1–21

Auernhammer, H. (2004): Informationstechnik Präziser Ackerbau. In: Matthies, H.J., Meier, F. (Hg.): Jahrbuch Agrartechnik Bd. 16, Münster, S. 31–38

Auernhammer, H., Mayer, M., Demmel, M. (2000): Transborder farming in smale-scale land use system. CIGR Tsukuba, Japan

Australian Government (Department of Agriculture, Fisheries and Forestry) (2005a): Capitalising on innvovation – The future for Precision Agriculture in Australia. http://www.affa.gov.au/content/output.cfm?ObjectID=D2C48F86-BA1A-11A1-A2200060B0A06294 (Zugriff November 2005)

Australian Government (Department of Agriculture, Fisheries and Forestry) (2005b): Agribusiness and Sustainable Agriculture – Appendix 2. http://www.daff.gov.au/content/output.cfm?ObjectID=E254DFB2-9077-4DF6-B612D787C3E02B8A (Zugriff November 2005)

Babcock, B. A. (1992): The effects of uncertainty on optimal nitrogen applications. In: Review of Agricultural Economics 14, S. 271–280

Bach, M., Frede, H.-G. (2003): Pflanzenschutzmittel in Gewässern – Ansätze zur Feststellung signifikanter Belastungen nach WRRL. In: Wasser & Boden 55, S. 36–42

BBA (Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft) (2005a): Beiträge der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft zum Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz. http://www.bba.de/mitteil/aktuelles/forumpfs/beitraege_bba.pdf (Zugriff November 2005)

BBA (Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft) (2005b): Hot-Spot-Management. http://www.bba.de/mitteil/aktuelles/reduktionsprog/massnahme5.htm (Zugriff November 2005)

Behrendt, H., Bach, M., Opitz, D., Pagenkopf, W.-G. (1999): Verursacherbezogene Modellierung der Nitratbelastung der Oberflächengewässer. Anwendung der Immissionsverfahren zur Berichterstattung zur EU-Nitratrichtlinie, Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei im Forschungsverbund Berlin

BfN (Bundesamt für Naturschutz) (Hg.) (2004): Daten zur Natur 2004. Münster

BfN (Bundesamt für Naturschutz) (Hg.) (2005a): Rote Liste gefährdeter Tiere. Aktuelle Gefährdungssituation, http://www.bfn.de/0322_tiere.html (Zugriff August 2005)

BfN (Bundesamt für Naturschutz) (Hg.) (2005b): Rote Liste gefährdeter Pflanzen. Aktuelle Gefährdungssituation, http://www.bfn.de/0322_pflanzen.html (Zugriff August 2005)

Biller, R. H., Schicke, R. (2000): Multi-frequency optical identification of different weeds and crops for herbicide reduction in precision agriculture. In: Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture. University of Minnesota, CD-ROM

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2004): Durch Licht das Unkraut von der Nutzpflanze trennen. In: FORSCHUNG konkret 02, S. 3

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2005): Bekanntmachung des BMBF für die Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“. http://www.bmbf.de/foerderungen/3159.php (Zugriff November 2005)

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (1997): Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung in Deutschland. Bericht der Bundesregierung anlässlich der UN-Sondergeneralversammlung über Umwelt und Entwicklung 1997 in New York, Bonn

BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (2002): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2002. Münster-Hiltrup

BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (2004a): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2004. Münster-Hiltrup

BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (2004b): Maßnahmenkatalog zur Umsetzung des Reduktionsprogramms chemischer Pflanzenschutz. S. 28

BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) (2005): Ernährungs- und agrarpolitischer Bericht 2005 der Bundesregierung. Berlin

Bongiovanni, R., Lowenberg-DeBoer, J. (2004): Precision Agriculture and sustainability. In: Precision Agriculture 5(4), S. 359–388

Brown, L. (1997): The agricultural link: How environmental deteriation could disrupt economic progress. Worldwatch Paper 136, Washington, DC

Bundesregierung (2002): Perspektiven für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. http://www.nachhaltigkeitsrat.de/service/download/pdf/Nachhaltigkeitsstrategie_Kurzfassung.pdf (Zugriff: Juli 2005)

Bundesregierung (2004): Perspektiven für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Fortschrittsbericht 2004, http://www.amcham.de/fileadmin/templates/main/pdf/Nachhaltigkeit.pdf (Zugriff Juli 2005)

Bundesregierung (2005): Unterrichtung der Bundesregierung – Agrarpolitischer Bericht 2005 der Bundesregierung. Deutscher Bundestag, Drucksache 15/4801, Berlin

Chamen, W. C. T., Cope, R. E., Longstaff, D. J., Patterson, D. E., Richardson, C. D. (1996): The energy efficiency of seedbed preparation following mouldboard ploughing. In: Soil and Tillage Research 39, S. 13–30

Chapron, M., Requena-Esteso, M., Boissard, L., Assemat, L. (1999): A method for recognizing vegetal species from multispectral images. In: Stafford, J.V. (Hg.): Precision Agriculture. 2nd European Conference on Precision Agriculture, Sheffield, S. 239–248

Christen, O. (1996): Nachhaltige Landwirtschaft („Sustainable agriculture“) – Ideengeschichte, Inhalte und Konsequenzen für Forschung, Lehre und Beratung. In: Berichte über Landwirtschaft 74, S. 66–86

Christen, O. (1998a): No more definitions please! Some reflections about the ideas and principles of sustainable agriculture. In: El Bassal Bassam, N., Behl, R. K., Prochnow, B. (Hg.): Sustainable Agriculture for Food, Energy and Industry. London, S. 48–52

Clements, D. R., Weise, S. F., Brown, R., Stonehouse, D. P., Hume, D. J., Swanton C. J. (1995): Energy analysis of tillage and herbicide inputs in alternative weed management systems. In: Agriculture, Ecosystems and Environment 52, S. 119–128

Coenen, R., Grunwald, A. (2003): Nachhaltigkeitsprobleme in Deutschland: Analyse und Lösungsstrategien. In: Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland Bd. 5, Berlin

Cook, S. E., Adams, M. L. (2000): What is obstructing the wider adoption of precision agriculture technology? In: Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture. July 16–19, 2000. Bloomington, Minnesota, USA, CD-ROM

CSD (Commission on Sustainable Development) (1995): 3rd session New York, 11–28 April 1995, CSD Document E/CN.17/1995/6: Promoting Sustainable Agriculture and rural development. http://daccessdds.un.org/doc/UNDOC/GEN/N95/024/41/PDF/N9502441.pdf?OpenElement (Zugriff Juli 2005)

CSD (Commission on Sustainable Development) (1997): Special Session of the General Assembly to review and appraise the implementation of Agenda 21. New York, 23–27 June 1997, CSD Document: Promoting Sustainable Agriculture and rural development. E/CN.17/1997/2 Add.13, http://daccessdds.un.org/doc/UNDOC/GEN/N97/018/41/PDF/N9701841.pdf?OpenElement (Zugriff Juli 2005)

CSD (Commission on Sustainable Development) (2000): eighth session of the UN Commission on Sustainable Development (CSD-8) met at UN Headquarters in New York on 30 April 1999 and from 24 April to 5 May 2000. Several documents concerning Sustainable Agriculture and rural development, http://www.un.org/esa/sustdev/documents/docs_sdissues_agri.htm (Zugriff Juli 2005)

CSD (Commission on Sustainable Development) (2002): Outcomes of the Johannesburg Summit 2002. Several UN documents. http://www.johannesburgsummit.org/html/documents/prepcoms.html (Zugriff Juli 2005)

Dabbert, S., Kilian, B. (2002): Ökonomie. In: Werner/Jarfe 2002, S. 423–446

Daberkow, S. G., McBride, W. D. (2000): Adoption of Precision Agriculture technologies by U.S. farmers. In: Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture. Bloomington, Minnesota, USA, CD-ROM

Dachler, M. (2002): Zufuhr von Cadmium durch Mineraldünger – die Situation in Europa. Beitrag zur Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft landwirtschaftlicher Versuchsanstalten in Klosterneuburg, http://www.alva.at/alva2002/tagung/dachler.pdf (Zugriff Oktober 2005)

DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2006): Per Satellit Gülle ausbringen und zugleich die Umwelt schonen. Pressemitteilung der DBU vom 7. April 2006

DBV (Deutscher Bauernverband) (2000): Agrimente 2000. Bonn

DBV (Deutscher Bauernverband) (2004): Energieverbrauch der Landwirtschaft. In: Situationsbericht 2004. Bonn

DBV (Deutscher Bauernverband) (2005): Situationsbericht der Landwirtschaft. http://www.situationsbericht.de/ (Zugriff Dezember 2005)

Demmel, M. (2004): Hohe Genauigkeit ist möglich – DGPS als Schlüsseltechnologie der Georeferenzierung. In: PA-Praxis, Stuttgart, S. 21–23

Doluschitz, R. (2003): Precision Agriculture-applications, economic considerations, experiences and perspectives. In: Proceedings of the EFITA Conference. http://www.date.hu/efita2003/centre/pdf/1001.pdf (Zugriff Juni 2004)

EEA (Europäische Umweltagentur) (2000): Environmental Signals 2000. Regular indicator report No. 6, http://reports.eea.eu.int/signals-2000/en (Zugriff Juli 2004)

EEA (Europäische Umweltagentur) (2001): Environmental Signals 2001. Regular indicator report No. 8, http://reports.eea.eu.int/signals-2001/en (Zugriff Juli 2004)

EEA (Europäische Umweltagentur) (2002): Environmental Signals 2002. Regular indicator report No. 9, http://reports.eea.eu.int/environmental_assessment_report_2002_9/en (Zugriff Juli 2004)

EEA (Europäische Umweltagentur) (2004): Environmental Signals 2004. http://reports.eea.eu.int/signals-2004/en (Zugriff Juli 2004)

Ehlert, D. (1994): Technik und Verfahren der kleinräumigen Bestandesführung – Handlungsbedarf. In: KTBL-Arbeitspapier 210, S. 64–72

Ehlert, D., Dammer, K.-H. (2002): Herbizide, Fungizide und Wachstumsregler. In: Werner/Jarfe 2002, S. 275–292

Ehlert, D., Dammer, K.-H., Völker, U. (2004): Applikation nach Pflanzenmasse. In: Landtechnik 59(2), S. 76–77

Ehlert, D., Hammen, V., Adamek, R. (2003): On-line sensor pendulum-meter for determination of plant mass. In: Precision Agriculture 4(2), S. 139–148

Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages (1994): Schutz der grünen Erde – Klimaschutz durch umweltgerechte Landwirtschaft und Erhalt der Wälder. Bonn

Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestages (1998): Konzept Nachhaltigkeit. Vom Leitbild zur Umsetzung. Deutscher Bundestag, Bundestagsdrucksache 13/11200, Bonn

Epperlein, J., Metz, R. (2003): Strukturschonende Bodenbearbeitung. In: Flade, M., Plachter, H., Henne, E., Anders, K. (Hg.): Naturschutz in der Agrarwirtschaft – Ergebnisse des Schorfheide-Chorin-Projektes. Wiebelsheim

EU (Europäische Kommission) (2001): Nachhaltige Entwicklung in Europa für eine bessere Welt: Strategie der Europäischen Union für eine nachhaltige Entwicklung. KOM (2001)264 vom 15.05.2001, http://europa.eu.int/eur-lex/de/com/cnc/2001/com2001_0264de01.pdf (Zugriff Juli 2005)

EU (Europäische Kommission) (2002): Die Lissabonner Strategie – den Wandel herbeiführen. Mitteilung der Europäischen Gemeinschaften vom 15. Januar 2002, http://europa.eu/comm/barcelona_council/14_de.pdf (Zugriff Juli 2004)

EU(Europäische Kommission) (2005): Ein Neustart für die Lissabon-Strategie. http://europa.eu.int/growthandjobs/intro_de.htm (Zugriff November 2005)

Finck, A. (1992): Dünger und Düngung, Wiesbaden

Fluck, R. (1992): Energy in farm production. In: Energy in World Agriculture. Amsterdam, S. 1–29

Funke, J. (2000): Erarbeitung einer Kosten- und Nutzenanalyse von Verfahren der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Marktfruchtbau Brandenburgs und

Entwicklung eines betriebswirtschaftlichen Entscheidungstableaus. Diplomarbeit, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät der Humboldt-Universität Berlin

Ganzelmeier H. (2004): Pflanzenschutz- und Pflanzenpflegetechnik. Jahrbuch Agrartechnik, KTBL VDI-MEG, S. 94

Gebhardt, S., Kühbauch, W. (2005): Untersuchungen zur Unkrauterkennung im Grünland mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung. In: Bornimer Agrartechnische Berichte zum Workshop „Anwendung der Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft“, S. 124–130

Geier, U., Köpke, U. (2000): Analyse und Optimierung des betrieblichen Umweltbewertungsverfahrens“ Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung (KUL), Berichte über Landwirtschaft 78, S. 70–91

Gerhards, R., Sökefeld, M., Nabout, A., Therburg, R.-D., Kühbauch, W. (2002a): Online weed control using digital image analysis. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Sonderheft XVIII, S. 421-425

Gerhards, R., Sökefeld, M., Timmermann, C., Kühbauch, W., Williams II, M. M. (2002b): Site-specific weed control in maize, sugar beet, winter wheat, and winter barley. In: Precision Agriculture 3(1), S. 25–35

Godwin, R. J., Wood, G. A., Taylor, J. C., Knight, S. M., Welsh, J. P. (2003): Precision Farming of cereal crops: a review of a six year experiment to develop management guidelines. In: Biosystems Engineering 84(4), S. 375–391

Griffin, B. (2004): GPS in der Automotive-Messtechnik. http://www.elektroniknet.de/topics/messen&testen/fachthemen/2004/0009 (Zugriff November 2005)

Griffin, S. J. (2000): Benefits and problems of using yield maps in the UK – a survey of users. Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture, July 16–19, 2000. Bloomington, Minnesota, USA, CD ROM

Grusy, R. (2003): Precision Farming in Central Kentucky: Evaluating public and private sector influence on the adoption decision. In: Soil Science News & Views 23(2) http://www.uky.edu/Ag/Agronomy/Extension/ssnv/ssnvl232.pdf (Zugriff Juni 2004)

Guerin, T. F. (1999): An Australian perspective on the constraints to the transfer and adoption of innovations in land management. In: Environmental conservation 26, S. 289–304

Gumpertsberger, E., Jürgens, C. (2003): Acceptance of Precision Agriculture in Germany – Results of a Survey in 2001. In: Stafford, J., Werner, A. (Hg.): Precision Agriculture. Wageningen, S. 259–264

Gutsche, V., Golla, B., Ganzelmeier, H. (2004): GIS: Neue Ansätze bei der Ausbringung chemischer Pflanzenschutzmittel. In: ForschungsReport 2004 (1), S. 4–7

Haas, G. (1995): Betriebsbedingte Nährstoffbilanzen am Beispiel des Organischen Landbaus. In: Verband der Landwirtschaftskammern (Hg.): Nährstoffbilanz im Blickfeld von Landwirtschaft und Umwelt. Frankfurt a. M, S. 93–110

Haas, G. (2001): Organischer Landbau in Wasserschutzgebieten: Leistungsfähigkeit und Optimierung des pflanzenbaulichen Stickstoffmanagements. Habilitationsschrift, Berlin

Haas, G., Wetterich, F., Köpke, U. (2001): Comparing intensive, extensified and organic grassland farming in southern Germany by process life cycle assessment. In: Agriculture, Ecosystems and Environment 83, S. 43–53

Harenz, H., Köster, W., Merkel, D. (1992): Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumbilanzen der Landwirtschaft der Bundesrepublik Deutschland und der ehemaligen DDR von 1950 bis 1988. In: Agribiol. Res. 45(4), S. 285–293

Hrubovcak, J., Vasavada, U., Aldy, J. (1999): Green Technologies for a more sustainable agriculture. In: Agriculture Information Bulletin No. AIB752. http://www.ers.usda.gov/publications/aib752/ (Zugriff November 2005)

Hurni, H. (2000): Assessing sustainable land management (SLM). In: Agriculture, Ecosystems and Environment 81, S. 83–92

Iida, M. (2003): Precision Agriculture in Japan. http://pars.ifas.ufl.edu/Technical%20Session/01-1017-Michi&JP/Dr.MichiIida.pdf (Zugriff August 2005)

IÖW (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung) (2005): „Agrobiodiversität entwickeln“. http://www.agrobiodiversitaet.net/ (Zugriff November 2005)

Ito, N. (2002): Precision Farming and its potentiality – innovative frontier technology for agriculture. http://www.hcmuaf.edu.vn/hoithao/kck/precision%20farming%20and%20its%20potentiality.pdf (Zugriff November 2005)

Jacobi, J., Gerhards, R., Kühbauch, W. (2003): Detecting fungual pathogens in wheat by use of image analysis. In: Werner/Jarfe, A. (Hg.): Programme Book of the joint conference of ECPA – ECPLF, Wageningen, S. 225

Jürgens, C. (2006): Langsames, aber stetiges Wachstum. Beobachtungen zur Akzeptanz von Precision Farming in Deutschland, http://www.preagro.de/Veroeff/NL_1_2006_Juergens.pdf (Zugriff März 2006)

Jürschik, P. (1999): Teilflächenspezifische Düngung – Grundlagen, Konzepte, technische Lösungen. DLG Merkblatt 315, Frankfurt a. M.

Kersebaum, K.-C., Lorenz, K. (2002): Lokaler N-Austrag. In: Werner/Jarfe 2002, S. 369–383

Kilian, B., Grabo, A. (2002): Wirkungsweise des Hydro N-Sensors umfassend untersucht. In: Neue Landwirtschaft 8, S. 34–36

Klee, U., Hofmann, L. (2005): Wie von Geisterhand – Automatische Lenksysteme für Traktoren. In: PA Praxis, Stuttgart, S. 16–20

Kopfmüller, J. Brandl, V., Jörissen, J., Paetau, M., Banse, G., Coenen, R., Grunwald, A. (Hg.) (2001): Nachhaltige Entwicklung integrativ betrachtet. Konstitutive Elemente, Regeln und Indikatoren. Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland, Bd. 1, Berlin

Kriegbaum, H. (1997): Experimentelle Untersuchungen zu den Auswirkungen der Aussaatdichte von Winter- und Sommergerste auf die Entwicklung der Segetalflora mit einem Beitrag zur Ökologie der Wildbienen. Schriftenreihe des Bayrischen Landesamts für Umweltschutz 142, S. 59–78

KTBL (2002): Global Positioning System (GPS) in der Praxis. http://www.ktbl.de/teilfl/teilflaeche.htm (Zugriff Juli 2005)

KTBL (2004): Betriebsplanung Landwirtschaft 2004/2005. Darmstadt

Küsters, J., Lammel, J. (1999): Investigations of the energy efficiency of the production of winter wheat and sugar beet in Europe. In: European Journal of Agronomy 11, S. 35–43

Lambert, D., Lowenbert-DeBoer, J. (2000): Precision Agriculture profitability review. Site-Specific Management Center, School of Agriculture, Purdue University

Leithold, P. (2004): Gut gezielt – Online-Sensoren im Pflanzenbau. In: PA Praxis, Stuttgart, S. 26–29

Leiva, F. R., Morris, J. Blackmore, B.S. (1997): Precision Farming techniques for Sustainable Agriculture. In: Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture. 8-10 September 1997. Warwick, UK, CD ROM

Lettner, J., Hank, K., Wagner, P. (2001): Ökonomische Potenziale der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung. In: Berichte über Landwirtschaft 79(1), S. 107–139

Lindenthal, Th. (2000): Phosphorvorräte in Böden, betriebliche Phosphorbilanzen, und Phosphorversorgung im Biologischen Landbau. Dissertation an Institut für Ökologischen Landbau, Universität für Bodenkultur Wien

Linkh, G., Sprich, H., Flaig H. (1997): Nachhaltige Landwirtschaft und Forstwirtschaft. Vorausssetzungen, Möglichkeiten, Maßnahmen. Berlin

Liu, J., Sun, S., Ninomiya, S., Cai, H. (2003): Three Precision Agriculture patterns based on technology and resources in China. http://www.date.hu/efita2003/centre/pdf/1003.pdf (Zugriff August 2005)

Lowenberg-DeBoer, J. (2002): Will farmers choose Precision Farming or Convenience Agriculture? In: Site Specific Management Centre Newsletter, Purdue University

Ludowicy, C., Schwaiberger, R., Leithold, P. (2002): Precision Farming. Handbuch für die Praxis, Frankfurt a. M.

LUFA Rostock (2005): Phosphorgehalte landwirtschaftlich genutzter Böden – Eine aktuelle Übersicht aus den Bundesländern. Lufa aktuell, http://www.lms-lufa.de/index.phtml?showarchivdata-1&Instanz=10&Datensatz=13&SpecialTop=1 (Zugriff November 2005)

Lütticken, R. (1996): Realisierung des Raum-Zeit-Bezugs von Daten zur Umsetzung teilflächenspezifischer Bewirtschaftungsmaßnahmen im Pflanzenbau. Stuttgart

Maidl, F.-X., Schächtl, J., Huber, G. (2000): Ergebnisse von Streifenversuchen zur Untersuchung unterschiedlicher N-Düngungsstrategien im Precision Farming. In: Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft 13, S. 123–126

Mansvelt, van J. D. (1997): An interdisciplinary approach to integrate a range of agro-landscape values as proposed by representatives of various disciplines. In: Agriculture, Ecosystems and Environment 63, S. 233–250

Mason, J. (1997): Sustainable Agriculture. East Roseville

Mengel, K. (1997): Agronomic measures for better utilization of soil and fertilizer phosphates. In: European Journal of Agronomy 7, S. 221–233

Meyer, U. (2002): Pflanzenschutzpolitik in Deutschland. Reformbedarf und Handlungsempfehlungen, Bonn

Meyer-Aurich, A. (2001): Entwicklung von umwelt- und naturschutzgerechten Verfahren der ackerbaulichen Landnutzung für das Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin. Agrarökologie 41, Bern/Hannover

MSSRF (MS Swaminathan Research Foundation) (2004): Atlas of the sustainability of food security in India. http://www.mssrf.org/programmes/r_u/403/sustainable_atlas.htm (Zugriff November 2005)

Muhr, T., Noack, P. (2002): Aufbereitung von Ertragsdaten. In: Werner/Jarfe 2002 S. 169–178

Müller, K., Bork, H.-R., Dosch, A., Hagedorn, K., Kern, J., Peters, J., Petersen, H.-G., Nagel, J.-U., Schatz, T., Schmidt, R., Toussaint, V., Weith, T., Werner, A., Wotke, A. (Hg.) (2000): Nachhaltige Landnutzung im Konsens. Ansätze für eine dauerhaft-umweltgerechte Nutzung der Agrarlandschaften in Nordostdeutschland, Gießen

Müller-Elektronik (2004): CROP-Meter. http://www.mueller-elektronik.de/pdf/Produktinfo_CROP-Meter.pdf (Zugriff Juli 2004)

NABU (Naturschutzbund) (2002): Leistungen des Ökolandbaus für Umweltschutz und Nachhaltigkeit. Hintergrundpapier des NABU. http://www.nabu.de/m01/m01_02/00563.html (Zugriff Juli 2004)

Nordmeyer, H., Zuk, A., Häusler, A. (2003): Experiences of site specific weed control in winter cereals. In Stafford, J., Werner, A. (Hg.) (2003): Precision Agriculture. Wageningen, S. 457–462

OECD (Organization for Economic Cooperation & Development) (2001): Environmental indicators: Towards Sustainable Development. http://www.oecd.org/LongAbstract/0,2546,3n_2649_34441_2432411_119699_1_1_1,00.html (Zugriff Juli 2005)

Ostheim, K.-U. (2000): Prüfung der ökonomischen und ökologischen Vorzüglichkeit einer GPS-gestützten teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung. Gutachten im Auftrag der Stiftung Westfälische Landschaft in Münster, Münster-Hiltrup

Pagel, H. (1987): Phosphorvorräte und Phosphornachlieferungsvermögen der Böden. In: Tagungsbericht der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR 257, S. 59–66

Pedersen, S. M., Ferguson, R. B., Lark, M. A. (2001): Comparison of producer adoption of precision agricultural practices in Denmark, the United Kingdom and the United States. SJFI – Working Paper No. 2

Plachter, H., Janßen, B. (2002): Naturschutzziele. In: Werner/Jarfe 2002, S. 399–410

Reiche, E.-W., Rinker, A., Windhorst, W., Kersebaum, K.-C., Lorenz, K., Plachter, H., Janßen, B. (2002): Untersuchungen zu möglichen ökologischen Auswirkungen teilschlagspezifischer Pflanzenbaumaßnahmen. In: Werner/Jarfe 2002, S. 365–368

Robert, P. C. (1999): Precision Agriculture: an information revolution in agriculture. Report on the USDA Agricultural Outlook Forum, 23. Feb. 1999

Rothmund, M., Auernhammer, H., Demmel, M. (2003): First results of Transborder-Farming in Zeilitzheim (Bavaria, Germany). Japanese-German Agricultural Engineering Seminar 2003 (June 3rd), Freising-Weihenstephan

Ruckelshausen, A., Dzinaj, T., Gelze, F., Kleine-Hörstkamp, S., Linz, A., Marquering, J. (1999): Microcontroller based multi-sensor system for online crop/weed detection. In: Proceedings of the International Brighton Conference: Weeds volume 2, S. 601–606

Scheller, E. (1993): Wissenschaftliche Grundlagen zum Verständnis der Düngungspraxis im Ökologischen Landbau – Aktive Nährstoffmobilisierung und ihre Rahmenbedingungen. Dipperz

Schmerler, J., Heisig, M., Schober, H., Schellpeper, G., Adamek, R., Grothe, K., Giebel, A., Flemming-Fischer, E., Frank, U., Anlauff, A., Wendt, U. (2001): Ergebnisse über Verfahren zur teilflächenspezifischen Pflanzenproduktion. Forschungsberichte des ATB Potsdam-Bornim

Schraut, M. (2000): Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen. Dissertation, TU München

Shanwad, U. K. (2005): Precision Farming: A ray of hope for Sustainable Agriculture. Department of agronomy, University of agriculture sciences, Dharwad, Karnataka, India. http://www.gisdevelopment.net/application/agriculture/overview/mi03124abs.htm (Zugriff November 2005)

Smith, K. R. (2002): Does Off-Farm work hinder „Smart“ Farming? In: USDA-ERS Agricultural Outlook 2002, S. 28–30

Smith, L. A., Thomson, S. J. (2003): United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service: Research in application technology for pest management. In: Pest Management Science 59, S. 699–707

Sommer, C., Voßhenrich, H.-H. (2002): Bodenbearbeitung. In: Werner/Jarfe 2002, S. 237–249

SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (1996): Sondergutachten Landwirtschaft: Konzepte einer dauerhaft umweltgerechten Nutzung ländlicher Räume. Stuttgart

SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2000): Umweltgutachten 2000: Schritte ins nächste Jahrtausend. Stuttgart

SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2004): Umweltgutachten 2004: Umweltpolitische Handlungsfähigkeit sichern. Baden-Baden

Stafford, J. V., Ambler B. (1994): In-field location using GPS for spatially variable field operations. In: Computers and Electronics in Agriculture 11, S. 23–36

Statistisches Bundesamt (2003): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Münster-Hiltrup

Swanton, C. J., Murphya, S. D., Humea, D. J., Clements, D. R. (1996): Recent improvements in the energy efficiency of agriculture: Case studies from Ontario, Canada. In: Agricultural Systems 52, S. 399–418

Swinton, S. M., Lowenberg-DeBoer, J. (1998): Evaluating the profitability of site-specific farming. In: Journal of Production Agriculture 11, S. 439–446

SZ (Süddeutsche Zeitung) (2005): Der Bulldog ist tot – Heute ist die Software die Seele eines Schleppers, und Satelliten steuern die Ernte zentimetergenau. 19./20. März 2005, S. V1/1

TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2004): Stand und Perspektiven des Einsatzes von moderner Agrartechnik im ökologischen Landbau (Autoren: Dusseldorp, M., Rösch, C.). TAB-Hintergrundpapier Nr. 12, Berlin (http://www.tab.fzk.de/de/projekt/zusammenfassung/hp12.pdf)

TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2005): Alternative Kulturpflanzen und Anbauverfahren (Autor: Meyer, R.). 1. Bericht zum TA-Projekt „Moderne Agrartechniken und Produktionsmethoden – ökonomische und ökologische Potenziale“, TAB-Arbeitsbericht Nr. 103, Berlin

Thysen, I. (2000): Agriculture in the Information Society. In: J. Agricultural Eng. Research 76, S. 297–303

Timmermann, C., Gerhards, R., Kühbauch, W. (2003): The economic impact of site-specific weed control. In: Precision Agriculture 4(3), S. 249–260

UBA (Umweltbundesamt) (1997): Nachhaltiges Deutschland – Wege zu einer dauerhaft-umweltgerechten Entwicklung. Berlin

UBA (Umweltbundesamt) (2002): Zur einheitlichen Ableitung von Schwermetallgrenzwerten bei Düngemitteln. http://www.epea.com/pdf_files/UBA_31_07_02.pdf (Zugriff Juli 2005)

UBA (Umweltbundesamt) (2003a): Überblick über Abstandsauflagen für den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln an Gewässern. Presse-Information vom 7. März 2003

UBA (Umweltbundesamt) (2003b): Umweltrelevante Kenngrößen der Landwirtschaft (Pflanzenschutzmittelabsatz in Deutschland). In: Umweltdaten Deutschland Online. http://www.env-it.de/umweltdaten/ (Zugriff November 2005)

UBA (Umweltbundesamt) (2004): Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft. In: Umweltdaten Deutschland Online. http://www.env-it.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2284 (Zugriff November 2005)

UBA (Umweltbundesamt) (2005): Pflanzenschutzmittelabsatz in der Landwirtschaft. In: Umweltdaten Deutschland Online. http://www.env-it.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2284 (Zugriff Dezember 2005)

USDA (United States Department of Agriculture) (2002): Agricultural chemicals and production technology: questions and answers. http://www.ers.usda.gov/briefing/AgChemicals/Questions/susqa2.htm (Zugriff November 2005)

Van Meirvenne, M. (2003): Is the soil variability within small fields of Flanders structured enough to allow Precision Agriculture? In: Precision Agriculture 4(2), S. 193–201

van Schilfgaarde, J. (1999): Is Precision Agriculture sustainable? In: American Journal of Alternative Agriculture 14(1), S. 43–46

Vrindts, E., De Baerdemaeker, J. (1997): Optical discrimination of crop, weed and soil for on-line weed detection. In: Stafford, J. V. (Hg.): Precision Agriculture 1997. Oxford, S. 537–544

Wagner, P. (2005): Aspekte der Wirtschaftlichkeit von Precision Farming. http://www.landwirtschaft.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/download/Vortrag2_PF_Prof_Wagner_neu.pdf (Zugriff Juli 2005)

Weisz, R., Heiniger, R., White, J. G., Knox, B., Reed, L. (2003): Long-term variable rate lime and phosphorus application for Piedmont no-till field crops. In: Precision Agriculture 4(3), S. 311–330

Weltbank (2000): World Development Indicators. Washington

Weltzien, C., Noack, P., Muhr, T. (2002): Technologie – Qualität. In: Werner/Jarfe 2002, S. 147–152

Wenkel, K. O., Brozio, S., Gebbers, R. (2002): Düngung – Managementsystem ortsspezifischer Pflanzenbau. In: Werner/Jarfe A. 2002, S. 251–274

Werner, A,. Jarfe, A. (Hg.) (2002): Precision Agriculture: Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. Tagungsband Precision Agriculture Tage, 13. bis 15. März 2002 in Bonn, KTBL-Sonderveröffentlichung 038, Darmstadt

World Resources Institute (2001): World Resources 2000-2001: People and Ecosystems. http://www.wri.org (Zugriff August 2005)

Wuppertal Institut (1996): Zukunftsfähiges Deutschland. Ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung. Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt und Energie GmbH im Auftrag von BUND und MISEREOR, Basel

Zhang, N., Wang, M., Wang, N. (2000): Precision Agriculture – a worldwide overview. Proceedings of the ICETS International Conference on Engineering and Technological Sciences, Beijing, S. 112–122, http://www.lib.ksu.edu/depts/issa/china/icets2000/b/b1.pdf (Zugriff August 2005)

Zhang, N., Wang, M., Wang, N. (2002): Precision Agriculture – a worldwide overview. In: Computers and Electronics in Agriculture 36, S. 113–132

Zuk, A., Nordmeyer, H., Filser, J. (2003): Ecological effects of site-specific weed control: Weed distribution and occurrence of Collembola in the soil. In: Stafford, J., Werner, A. (Hg.) (2003): Precision Agriculture. Wageningen, S. 765–772

Zwerger, P., Malkomes, H.-P., Nordmeyer, H., Söchting, H.-P., Verschwele, A. (2004): Unkrautbekämpfung: Gegenwart und Zukunft – aus deutscher Sicht. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, S. 27–38

Anhang

1. Tabellenverzeichnis

		Seite
Tabelle 1	Grundsätzliche PA-Verfahrenstypen	14
Tabelle 2	Übersicht Datenquellen und ihre Verwendung im Offlineverfahren	16
Tabelle 3	Kenngrößen einzelner DGPS-Betriebsarten	20
Tabelle 4	Onlineansätze zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung	30
Tabelle 5	Übersicht über Kosten und Fördermittel von EU-Projekten zu PA und verwandten Themenbereichen	39
Tabelle 6	Kosten für Korrektursignale mit Genauigkeiten im Meterbereich	46
Tabelle 7	Kenngrößen für DGPS-gestützte automatische Traktorlenkungen	46
Tabelle 8	Investitionskosten für beispielhafte PA-Anwendungen	47
Tabelle 9	Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Düngung mit Phosphat und Kalium in Winterweizen	53
Tabelle 10	Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung in Winterweizen	54
Tabelle 11	Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Herbizidapplikation in Winterweizen	55
Tabelle 12	Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Wachstumsreglerapplikation in Winterweizen	56
Tabelle 13	Mindestnutzflächenbedarf zum wirtschaftlichen Einsatz von PA-Verfahren in Winterweizen	57
Tabelle 14	Umwelt- und naturschutzrelevante Ziele und Indikatoren mit Relevanz für die Landwirtschaft	75

2. Abbildungsverzeichnis

		Seite
Abbildung 1	Teilbereiche des präzisen Ackerbaus	13
Abbildung 2	Arbeitsweise einer Pflanzenschutzmittelspritze (Onlineverfahren)	15
Abbildung 3	Gerät EM38 zur Messung der elektrischen Bodenleitfähigkeit	19
Abbildung 4	Prinzipieller Aufbau des differenziellen GPS	19
Abbildung 5	CROP-Meter zur Messung der Pflanzenmassedichte für die Stickstoffdüngung	31
Abbildung 6	Prinzip der Nahinfrarot-Spektroskopie	35
Abbildung 7	Proteingehalt eines Winterweizenfeldes	35
Abbildung 8	Beispielhafte Darstellung der Bodenheterogenität eines Feldes auf der Grundlage von Ackerzahlen	42
Abbildung 9	Verteilung der Stickstoffapplikationsmenge eines Praxisbetriebs	50



Gesamtherstellung: H. Heenemann GmbH & Co., Buch- und Offsetdruckerei, Bessemerstraße 83–91, 12103 Berlin
Vertrieb: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH, Amsterdamer Str. 192, 50735 Köln, Telefon (02 21) 97 66 83 40, Telefax (02 21) 97 66 83 44
ISSN 0722-8333